

論 説

多変量解析を用いたボーリング孔での断層の区間判定と岩盤区分 — 瑞浪超深地層研究所における深層ボーリング孔での事例 —

鎧 顕正*・天野健治**・小池克明***・鶴田忠彦****・松岡稔幸****

Fault zone determination and bedrock classification through multivariate analysis — Case study using a dataset from a deep borehole in the Mizunami Underground Research Laboratory —

Kensho ABUMI*, Kenji AMANO**, Katsuaki KOIKE***, Tadahiko TSURUTA****,
and Toshiyuki MATSUOKA****

Abstract : Faults with a crush zone can strongly affect the mechanical, geochemical, and hydrological properties of a rock mass. Because of this, fault zones are treated as essential elements for evaluating the underground geological environment and the engineering performance of rocks. Because of the limitations to borehole investigations, it is not always possible to obtain sufficient, high-quality geological data. In addition, the evaluation of results may differ depending on various factors such as geological conditions and skill of the engineer or geologist. Such uncertainty can lead to difficulty in evaluation and understanding of the geological environment at depth and in the decision-making and planning of underground construction, which, as a result, may increase potential risks during construction. To reduce the uncertainty, this study proposes a data selection method using multivariate analysis composed of principal component analysis and a clustering method using data from a deep borehole investigation in the Mizunami Underground Research Laboratory (Mizunami City, Gifu, Central Japan). Utilizing this method and the analyses, the rocks could be accurately classified depending upon their geological characteristics. It was also possible to discriminate subtle differences in the rockmass. Furthermore, the location and width of fault zones were determined objectively. Accordingly, multivariate analysis, in considering the variety of data from different sources, proved to be more effective than traditional methods that analyze items individually. Moreover, a method to rank the variables used in the principal component analysis was developed using a logical and quantitative index that can arrange the variables in their order of importance. The proposed method developed in this study can provide useful geological and engineering information for 3-D geological modeling, construction of underground structures and groundwater flow analysis.

Key words : Fault zone, Bedrock classification, Multivariate Analysis, Borehole investigations

2011年5月16日受付 2011年8月29日受理

* 独立行政法人日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門東濃地科学研究ユニット（現 三菱マテリアルテクノ株式会社資源・環境・エネルギー事業部）Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate, Tono Geoscientific Research Unit, Yamanouchi 1-64, Akiyo, Mizunami, Gifu 509-6132 JAPAN (Now at Mitsubishi Materials Techno Corporation, Natural Resources, Environment and Energy Engineering Division, Kitabukuro 1-297, Omiya, Saitama 330-0835 JAPAN). E-mail : kabumi@mmc.co.jp

** 独立行政法人日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門幌延深地層研究ユニット Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate, Horonobe Underground Research Unit, Hokushin 432-2, Horonobe, Hokkaido 098-3224 JAPAN.

*** 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University, Katsura C1-2-215, Kyoto 615-8540 JAPAN.

**** 独立行政法人日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門東濃地科学研究ユニット Japan Atomic Energy Agency, Geological Isolation Research and Development Directorate, Tono Geoscientific Research Unit.

1. はじめに

岩盤中の破碎帯を伴うような断層区間は、直接的な変形作用や二次的な風化・変質作用により、岩盤の物性や力学的・化学的特性、透水性に強い影響を及ぼすことが多い。そのため断層が分布する区間を評価することは、地下の地質環境や地盤の工学的性能を評価する際の重要な要素の一つと位置付けられている（例えば、核燃料サイクル開発機構, 2005; 小坂, 1998; 田中・井上, 1995）。しかしながら、実際のボーリング孔による調査においては、時間的・空間的・経済的な制約が加えられ、常に同じ品質や量のデータが確保できるとは限らない。また、ボーリング調査サイトにおける地質の複雑さや特異性、あるいは調査を担当する地質技術者の熟練度や専門的知識の量、取得すべき地質データの記載基準など、諸条件によって断層区間の評価結果が異なる可能性がある。このような評価結果の差異は、3次元モデルの構築によって深部地質環境を空間的に理解していく過程での不確実性の増大につながり、その後の調査計画立案時における適切な意思決定を難しくするだけでなく、直接的な施工のリスク要因になる。

このような背景の中、スウェーデンの Stripa, Oskarshamn サイトでの Olsson(1992), Lindqvist et al.(2003, 2004) および、フィンランドの Kivetty, Olkiluoto, Hästholmen サイトでの Korkealaakso et al. (1994), Okko et al. (2003) など、海外の高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる調査・研究においては、単体あるいは複数のボーリング調査データに主成分分析を適用して、得られた主成分スコアから FZI (Fracture Zone Index) と呼ばれる基準を設定し、Fracture zones, あるいは Major features といった特徴的な区間を抽出・評価している。日本においても、佐々木・天野 (2004) が、単体のボーリング調査データに主成分分析を適用し、得られた主成分スコアの頻度分布から割れ目の卓越する区間（割れ目帯）を抽出・評価している。しかしながら、これらの報告は、主成分スコアを用いた定量的な評価ではあるものの、主成分分析に用いる複数の変数の選定基準が明確にされていない。また、例えば Olsson(1992) や佐々木・天野(2004) などは、健全な岩盤部の主成分スコアが概ね正規分布に従うと仮定し、Fracture zones などの区間を外れ値として抽出しているが、正規分布の適合度などの仮定に関する根拠は提示していない。加えて、既往の報告に共通して、評価すべき区間を抽出するための閾値の設定基準が客観化されていない。さらには、解析結果と実際の地質情報（変質程度や地質構造特性など）との比較検討といった、地質学的考察や妥当性の検証も十分に行われているとは言い難い。

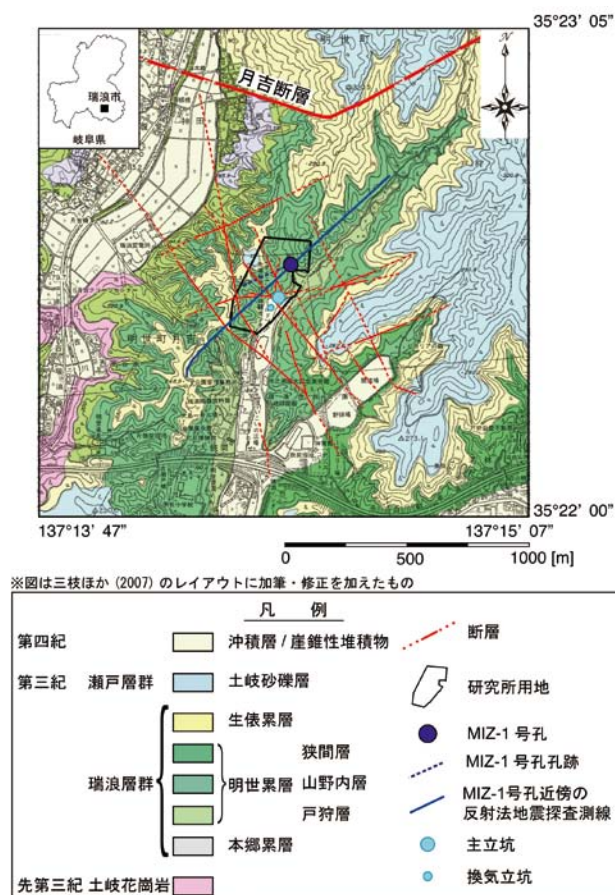
そこで本研究では、岐阜県瑞浪市で実施した深層ボーリング調査（MIZ-1 号孔）での取得データを基に、まず、使用変数の選定過程や理由を明確に示した上で、主成分分析を行った。次に、多変量データの統計学的分類法であるクラスタリング（例えば、新納, 2007）を適用することで、客観的な基準による精度の高い岩盤区分を行い、これに基

づいて断層が分布する区間の抽出と判定を試みた。さらに、地質データや物理探査データとの比較によって結果を考察し、手法の有用性に関して検討した。

2. 対象ボーリング孔とその周辺の地質概要

解析対象である MIZ-1 号孔は、(独) 日本原子力研究開発機構が、岐阜県瑞浪市に建設を進めている瑞浪超深地層研究所の用地内に掘削したコントロールボーリング孔である (Ota et al., 2005; 三枝ほか, 2007)。ボーリング孔周辺の地質を第 1 図に示す。本地域には、下位より、基盤岩である白亜紀の花崗岩（土岐花崗岩）、第三紀中新世の瑞浪層群、固結度の低い第三紀中新世以降の瀬戸層群が分布する (糸魚川, 1980)。MIZ-1 号孔においては、地表から掘削深度 109.14 m までは瑞浪層群、それ以深から孔底（掘削深度 1,300.00 m）までは土岐花崗岩が分布している。本研究では、この土岐花崗岩の区間を対象として解析を行った。

土岐花崗岩は美濃帯の中・古生界に非調和的に貫入した岩体で、主に中粒～粗粒の黒雲母花崗岩からなり (石原・鈴木, 1969)、本孔では、一部に破碎や変質の顕著な区間が見られる。



第 1 図 ボーリング孔周辺の地質図。

3. 解析方法

本解析では、深層ボーリング調査での取得データの中から、使用する変数を明確な基準で選択した。次に、選定した変数データを標準化し、多変量解析（主成分分析およびクラスタリング）を実施した。

ボーリング調査データは、単独の項目でもある程度の評価指標となり得るものの、その評価結果は、他の項目が示す結果とも整合することが不可欠である。一方で、互いに関連性があるはずの多項目のデータを同時に解釈することは困難である。そのため、データの有する多次元的特性をなるべく損なわず、かつ少ない次元に要約して評価を行うことが可能な主成分分析を適用した。また、評価すべき区間の抽出結果が、地質条件の違いや地質技術者の熟練度などに左右されないように、データ集合をデータ間の類似度にしたがって分類できるクラスタリングを採用した。これらの解析結果を基に、客観的な基準により岩盤を高精度で区分し、さらには断層区間の判定を可能にすることを試みた。

本解析で使用したデータ、および解析の内容と手順の詳細を以下に示す。

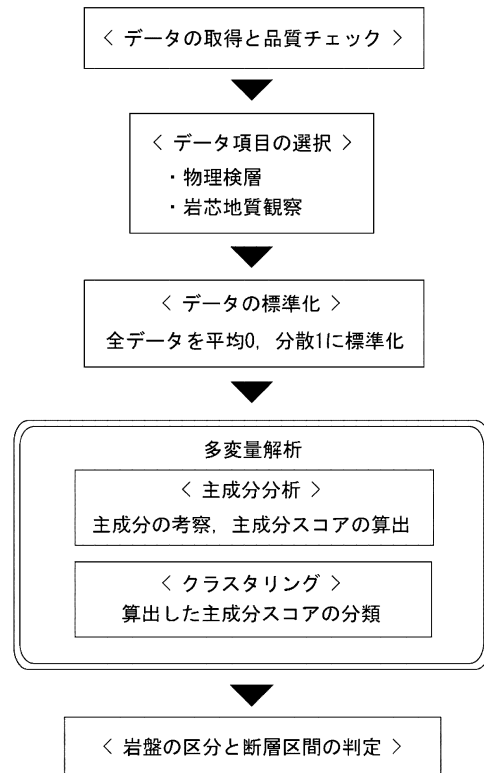
3.1 変数の選択

MIZ-1 号孔では、物理検層を始めとして、岩芯の地質観察や化学分析・物理試験、さらには水理・水質データに至るまで、多種多様な情報が取得されている（魚住ほか、2005）。それらの中から、多変量解析に適用できるデータとして、断層の分布や性状に関連し、かつ深度方向に連続的・定量的に取得された物理検層値（自然ガンマ線検層、自然電位検層、比抵抗検層 [ショートノルマル、ロングノルマル]、密度検層、孔径検層、中性子検層、音波検層）と、岩芯観察による RQD（Rock Quality Designation : Deere et al., 1967）を選択した。これら計 9 項目の選択理由は以下の通りである。

例えば、伊藤ほか（1996）や小村ほか（2001, 2003）により、断層やそれに伴う破碎帯においては、特に比抵抗・密度・弾性波速度が減少し、空隙率が増加することが報告されている。また、孔径検層はボーリング孔掘削による孔壁の崩壊程度を調べ、破碎帯や軟弱な地層を決定するのに有効な調査法であり（地盤工学会, 1999）、自然電位検層は比抵抗検層の示徴との対応が良く、自然ガンマ線強度は破碎帯中の粘土鉱物に反応を示すものと考えられる（小村ほか, 2003）。さらに、破碎帯には一般的に割れ目が発達している（田中・井上, 1995）。本孔では割れ目の孔内計測方法の一つであるボアホールテレビ（BTV）観察も実施したものの、破碎部における孔径拡大により、一部のデータの取得ができなかったため、岩芯による岩盤不連続性の評価指標である RQD を採用した。なお、比抵抗検層に関してはノルマル法とマイクロ法による測定を実施しているが、本解析で用いるデータが 1 m 単位であることを考慮し、ノルマル法によるショートノルマル（SN）検層およびロングノルマル（LN）検層の 2 項目を採用した。

3.2 解析内容とその流れ

第 2 図および以下の①～⑥に、解析内容とその流れを示す。なお、主成分分析とクラスタリングには、SAS Institute Japan 社の探索的統計解析ソフトウェア JMP® を使用した。



第 2 図 解析手順。

- ①データの取得と品質チェック：各種調査によりデータを取得し、得られたデータの欠損や、検層項目間での深度補正状況をチェックする。
- ②データ項目の選択：定量的に取得された数値データのうち、解析の目的に係り、かつ深度方向に連続的に取得されているデータ（前述の9項目）を、多変量解析の変数として選択する。
- ③データの標準化：データの解析単位を合わせるため、10 cm ごとに測定された物理検層値から 1 m 深度ごとの平均値を算出する。この際、次式によって 1 m 深度ごとの全データを平均 0、分散 1 に標準化する。

$$x = (x' - \mu) / \sigma \quad (1)$$
 ここで、 x は標準化した値、 x' は実測値、 μ は平均、 σ は標準偏差を表す。
- ④主成分分析：各主成分を考察するとともに、主成分スコアを算出する。
- ⑤クラスタリング：④で算出した主成分スコアによる分類を行う。
- ⑥岩盤区分と断層区間の判定：クラスタリングにより岩盤を区分し、その結果により断層区間を判定する。

4. 解析結果

4.1 主成分分析

主成分分析とは、線形変換により変数の特徴をより少ない直交軸で表現するための手法である。軸に対してデータの散らばり(分散)が大きい方から第1主成分、第2主成分、第3主成分、…、第 n 主成分となり、変数の数だけ主成分が算出される。主成分ごとに求まる固有値はこの分散に等しく、主成分がどの程度元の変数の情報を含んでいるかを表す。寄与率とは、固有値の合計に対する各主成分の固有値の割合であり、全主成分の情報量 100% に対して、各主成分が有する情報量であるとみなせる。累積寄与率は、第1主成分から当該主成分までの寄与率の合計である。また、各主成分軸上でのデータ値は、固有値に対する固有ベクトルを用いる次式の主成分スコアとして算出できる。

$$Z = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \cdots + a_nx_n \quad (2)$$

ここで、 Z は主成分スコア、 $a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ は各変数の固有ベクトル、 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$ は標準化した変数を表す。

主成分分析は通常、60% 程度以上の累積寄与率をもつ、少なくとも2つの主成分を採用してデータを分析する(菅, 2001)。しかし、累積寄与率の基準には明確な根拠はなく、対象データの種類や内容によって異なる(神宮・土田, 2008)ことから、累積寄与率を参考にしながら、主成分分析の目的や適用対象に応じて採用する主成分数を適切に決定する必要がある。そこで、本研究では、1以上の固有値をもち、10%以上の寄与率を示す第3主成分までを検討・考察の対象とし解釈を行った上で、分析する主成分数を決定した。なお、この検討には主成分負荷量を用いた。主成分負荷量とは、固有ベクトルに固有値の平方根を乗じたものである。本解析のように標準化した変数で主成分分析を行った場合には各変数の主成分への影響度は固有ベクトルと変わらない。しかしながら、この主成分負荷量は主成分と各

変数の相関係数であるため、その解釈のしやすさから、これを参考に各変数の主成分への影響度を評価した。

主成分分析結果を第1表にまとめる。第1主成分負荷量は、自然ガンマ線強度で極めて小さいが、その他の変数で大きな値となっている。一般的に Intact rock やそれに近い岩盤、すなわち岩質が新鮮・緻密かつ硬質である箇所(以下「健岩部」と記す)の物性値は、岩芯の連続性も良いことから、比抵抗・密度・P波速度・RQDで高く、地層空隙率や孔径で低い値を示すはずである。それに対して、断層岩や破碎帯、あるいは変質部など、岩盤状態が悪い箇所(以下「脆弱部」と記す)では、割れ目が多く卓越する、粘土変質化が進む、あるいは特定鉱物が溶解されているなど、その状態により特徴が大きく異なると考えられる。すなわち、物性値のいくつか、あるいは大部分が健岩部とは逆の傾向を示すはずである。実際、この予測は第1主成分負荷量の傾向と一致している。よって、第1主成分は比抵抗、密度、弾性波速度などで代表される「堅硬・脆弱さの度合い」を表す総合指標であると判断できる。

一方、第2主成分負荷量は、自然電位・比抵抗・孔径の3項目で大きな値を示している。つまり第2主成分は、特に自然電位や、比抵抗で代表される「電気伝導度の高い岩盤、もしくは間隙水を含有する度合い」を表す総合指標であると考えられる。また、第3主成分負荷量に関しては、自然ガンマ線強度のみが突出して大きく、「特定粘土鉱物の含有量」を強く表していると推定できる。しかしながら、自然ガンマ線強度は断層によって低い場合と高い場合の両方が存在し(吉村, 2005)、その評価のために断層中の粘土鉱物の種類や量を詳細に調査する必要がある。そこで、本解析では、基本的な地質情報や岩盤物性値で解釈と考察が可能となる第1・第2主成分のみを用いることとした。

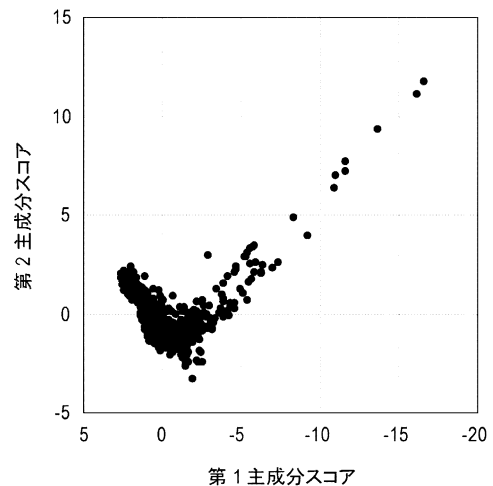
第1表 主成分分析結果。

	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分	第5主成分	第6主成分	第7主成分	第8主成分	第9主成分
固有値	3.81	1.79	1.27	0.74	0.58	0.38	0.25	0.16	0.02
寄与率(%)	42.28	19.87	14.11	8.27	6.40	4.21	2.77	1.83	0.27
累積寄与率(%)	42.28	62.15	76.26	84.53	90.93	95.14	97.91	99.73	100.00
主成分負荷量	自然ガンマ	-0.04	-0.19	0.87	0.11	0.41	-0.15	-0.02	0.05
	自然電位	-0.61	-0.59	-0.25	0.08	0.26	0.23	0.29	0.08
	比抵抗(SN)	0.78	0.59	0.05	-0.02	0.09	0.02	0.13	0.05
	比抵抗(LN)	0.79	0.53	-0.03	0.00	0.14	0.12	0.20	0.06
	密度	0.69	-0.43	0.22	-0.34	-0.08	0.34	-0.17	0.15
	P波速度	0.69	-0.43	-0.37	0.17	-0.02	-0.34	-0.02	0.23
	地層空隙率	-0.68	0.29	0.39	0.22	-0.44	0.05	0.10	0.21
	孔径	-0.62	0.52	-0.33	0.17	0.33	0.12	-0.26	0.15
	RQD	0.62	-0.22	0.05	0.71	-0.07	0.20	-0.07	-0.10
固有ベクトル	自然ガンマ	-0.02	-0.14	0.77	0.13	0.54	-0.24	-0.03	0.12
	自然電位	-0.31	-0.44	-0.23	0.09	0.34	0.37	0.58	0.20
	比抵抗(SN)	0.40	0.44	0.04	-0.02	0.12	0.03	0.25	0.11
	比抵抗(LN)	0.41	0.40	-0.02	0.00	0.18	0.20	0.39	0.16
	密度	0.35	-0.32	0.19	-0.40	-0.11	0.56	-0.34	0.37
	P波速度	0.36	-0.32	-0.33	0.20	-0.02	-0.55	-0.04	0.56
	地層空隙率	-0.35	0.22	0.34	0.25	-0.58	0.07	0.19	0.52
	孔径	-0.32	0.39	-0.29	0.20	0.43	0.20	-0.52	0.36
	RQD	0.32	-0.16	0.04	0.82	-0.09	0.33	-0.14	-0.24

4.2 クラスタリングによる岩盤区分

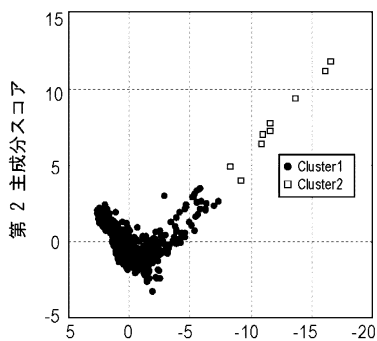
本解析で使用している変数は、ほぼ同じ岩相（花崗岩）で取得されたデータである。そのため、健岩部の物性値は同程度の値を示すはずである。これに対して、脆弱部では各物性値の場所ごとの変化が大きく、データのばらつきが大きいと考えられる。

第1・第2主成分スコアによる散布図は鉤状の屈折部をもち、第1主成分スコアが小さくなるにしたがってデータのばらつきが大きくなっている（第3図）。ここで、「堅硬・脆弱さの度合い」の指標とした第1主成分では、主成分スコアが小さくなるにしたがって、例えば亀裂破碎が卓越し、さらには破碎による変形や二次的な変質の進行により脆弱化が進むという傾向を示す。また、「電気伝導度の高い岩盤、もしくは間隙水を含有する度合い」の指標とした第2主成分においては、第1主成分スコアが極めて小さく、岩盤状態が著しく脆弱化した箇所で最高スコアをとる。ただし、第2主成分は、ある程度岩質が硬く緻密であるものの、亀裂破碎が多い場合に間隙水の存在により比抵抗が低く、自然電位で高い値となり、結果的にスコアが最小になると考えられる。以上の解釈から、脆弱部の区分を目的とすれば、散布図の屈折部付近でデータを分類することが妥当であると考えた。

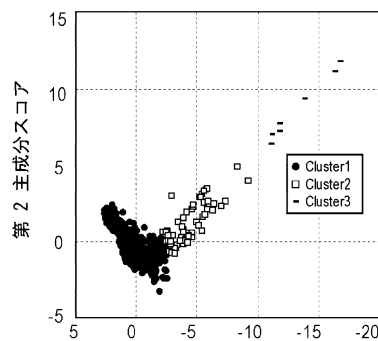


第3図 主成分スコア散布図。

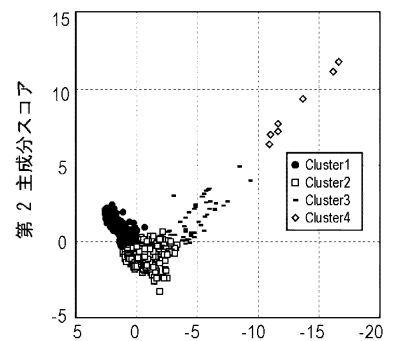
本解析では、できる限り客観的な基準によりこのデータ分類を行うために、第1・第2主成分スコアを用いたk-means法クラスタリングを適用した。その結果を第4図に示す。また、ここで、 k 個に分類したクラスターごとに求めた分散（クラスター内データのばらつき具合）の和は、クラスター数（ k ）の増大とともに急減する（第5図）。第



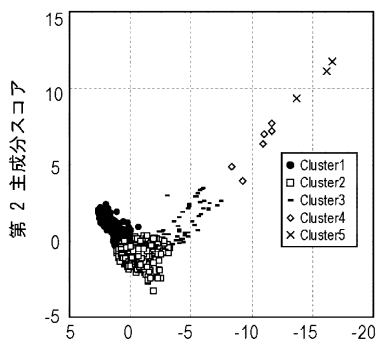
第1主成分スコア
〈2クラスター分類結果〉



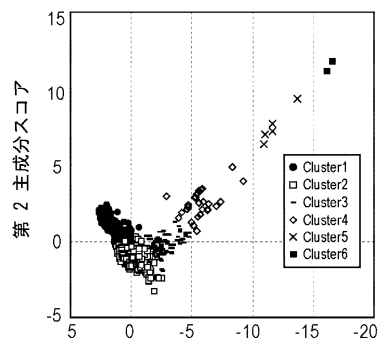
第1主成分スコア
〈3クラスター分類結果〉



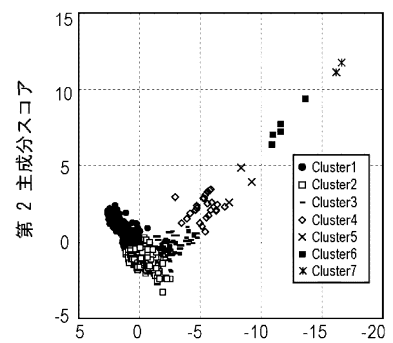
第1主成分スコア
〈4クラスター分類結果〉



第1主成分スコア
〈5クラスター分類結果〉



第1主成分スコア
〈6クラスター分類結果〉



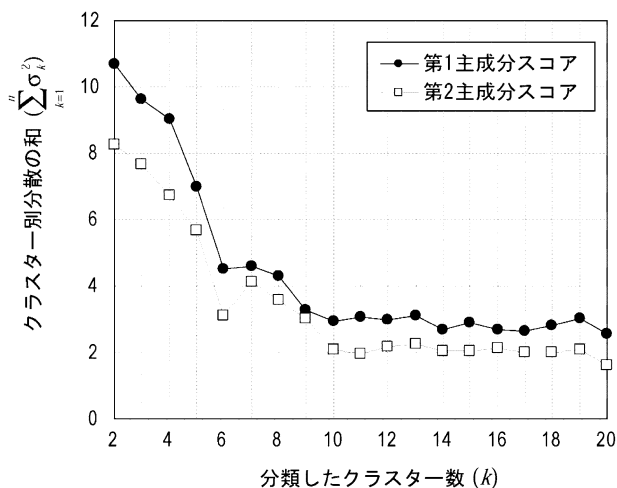
第1主成分スコア
〈7クラスター分類結果〉

第4図 クラスタリング結果。

5図より、6クラスターでその急減は止まるとともに、第4図より、クラスター2と3の境界がまさに、前述した散布図の屈折部に位置する（第4図）。

以上の理由から、6クラスター分類におけるクラスター3～6を岩盤中の脆弱部と判定した（第6図）。この区間

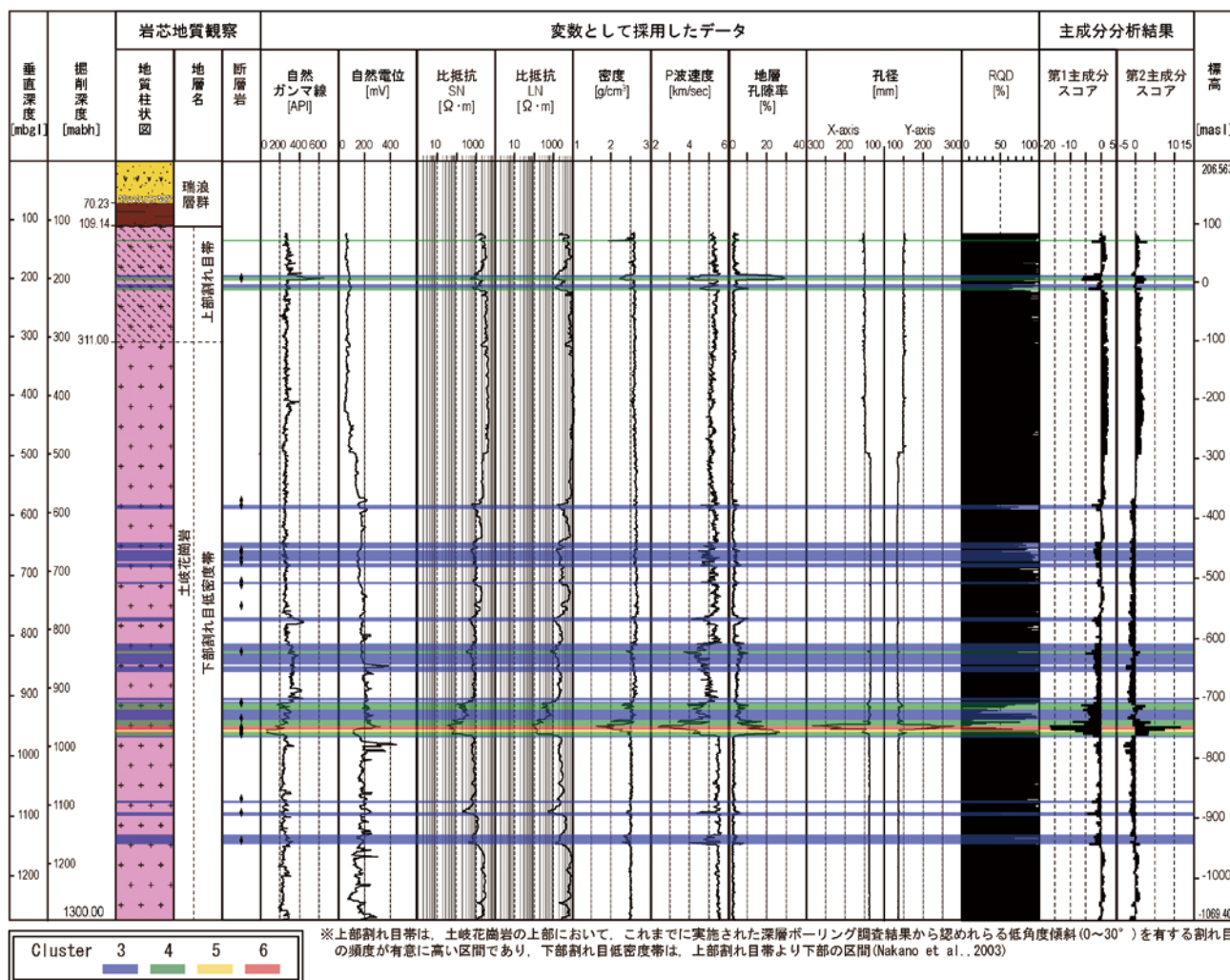
は139 m分であり、全解析データの延長1,174 mの約12%である。脆弱部と健岩部における各変数の平均値は大きく異なっており（第2表）、第7図から確認できるように、クラスタリング結果は実際取得した岩芯試料の状態とも整合的である。



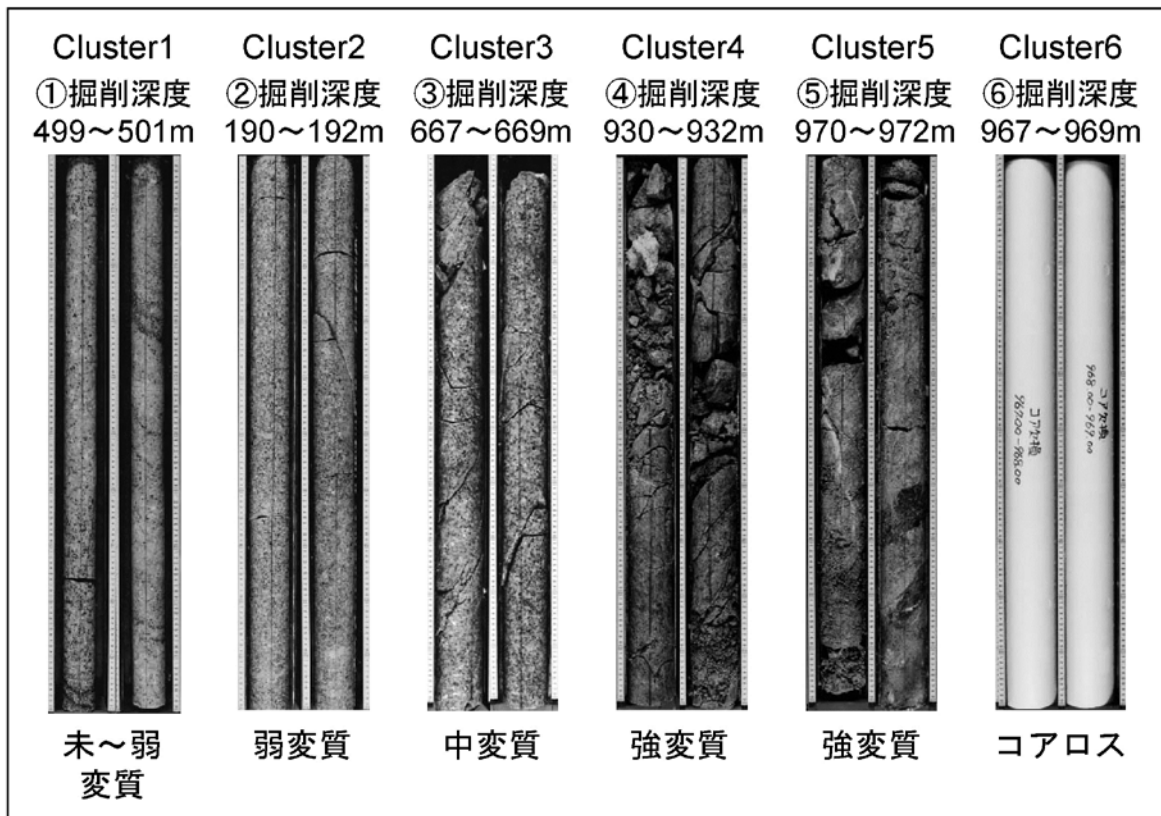
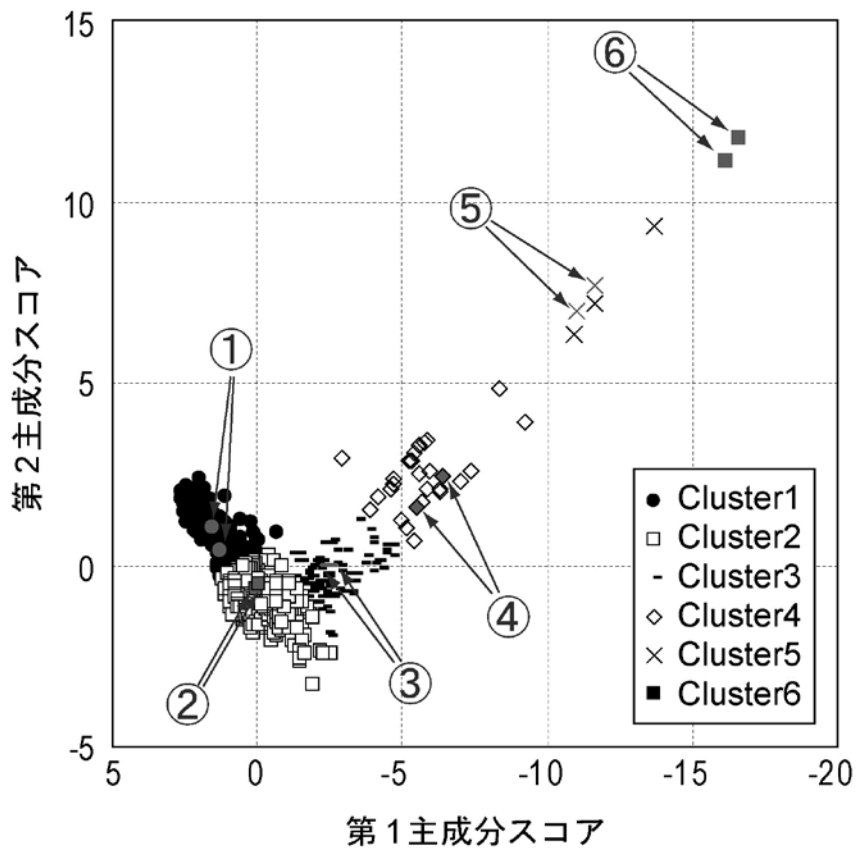
第5図 分類したクラスターごとに算出した分散の合計値の変化。

第2表 健岩部と脆弱部での平均値の比較。

項目	単位	健岩部 (Cluster 1~2)	脆弱部 (Cluster 3~6)
自然ガンマ	API	258.16	273.09
自然電位	mV	136.55	177.36
比抵抗 (SN)	$\Omega \cdot m$	2,135.19	477.12
比抵抗 (LN)	$\Omega \cdot m$	5,482.91	1,067.72
密度	g/cm^3	2.56	2.43
P波速度	km/sec	5.22	4.40
地層空隙率	%	2.81	8.32
孔径拡大	mm	1.03	8.38
RQD	%	97.30	66.29



第6図 クラスタリングによる岩盤区分結果。



第7図 クラスタリング結果と岩芯の比較. 散布図中の番号①～⑥, およびそれが矢印で示すポイントと下の岩芯写真がそれぞれ対応する.

4.3 断層区間の判定

断層の走向に平行もしくは斜交する複数の破碎帯が集中して発達し、それより外側では破碎帯が密集していない場合、それらの幅をまとめて1つの断層幅とみなすことができる(金折, 2001)。3.1でも述べたとおり、本解析で用いた多変量データは、すべて断層の分布や性状に関連すると判断でき、それらの主成分スコアのクラスタリングにより区分された脆弱部は、岩芯地質観察によって判読された比較的規模の大きい断層岩深度とも概ね整合する(第6図)。ここで、区分されたそれらの断層岩を含む脆弱部が1つ、あるいは一連の破碎帯、およびその外側に発達するダメージゾーン(Caine et al., 1996; 金折, 2001)を表していると仮定した場合、それらが集中して発達している区間を1つの断層幅とみなしても妥当である。しかしながら、通常の露頭やトレンチによる断層調査と比較して極端に地質情報が少ないボーリング調査においては、複数の破碎帯が近接して発達している場合、1つの断層幅とみなせる範囲を特定することは極めて困難である。この問題に対し本研究では、自己相関関係と移動平均を用いることで、断層幅を定量化し、断層区間の抽出を試みた。

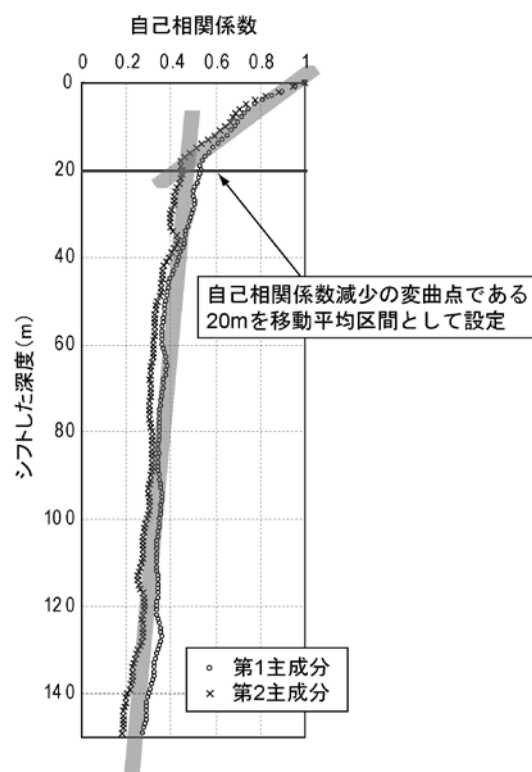
具体的には、まず、クラスタリングに用いた第1・第2主成分スコアそれぞれの区間深度をシフトして自己相関係数を計算し、この変化から移動平均において最適と考えられる期数(ラグ)を求めた(第8図)。図より、第1・第2主成分スコアともに、自己相関係数の減少はラグ20mで収束することがわかる。つまり、20mを移動平均区間と設定すれば、データの主要な特徴を保持したままバックグラウンドノイズを最大限に除去できるといえる。そこで、第1・第2主成分スコアにより分類されたクラスター番号を20mで移動平均し(第9図)、この平滑化グラフ上で特異な部分、すなわち、健岩部としたクラスター番号である2より大きくなる部分を1区間と設定した。クラスター番号は番号の大きさに意味のないカテゴリーデータであるので、番号の空間分布の解析に移動平均法を用いることは一般的でない。しかしながら、ここでは本解析結果からクラスター番号が大きくなるほど岩盤状態が悪くなる傾向が明らかとなったので、番号と岩盤状態とが概ね対応しており、トレンドから外れた岩盤部分を番号から抽出できると判断した。

次に、岩芯地質観察において比較的規模の大きい断層岩が観察されている区間内の脆弱部をまとめることで、1つの断層幅(断層区間)を定義した。第9図に示す各区間のコンターダイアグラムからは、割れ目データが一定の範囲に集中している区間が多く、これらの区間は1つの断層区間である可能性が高い。

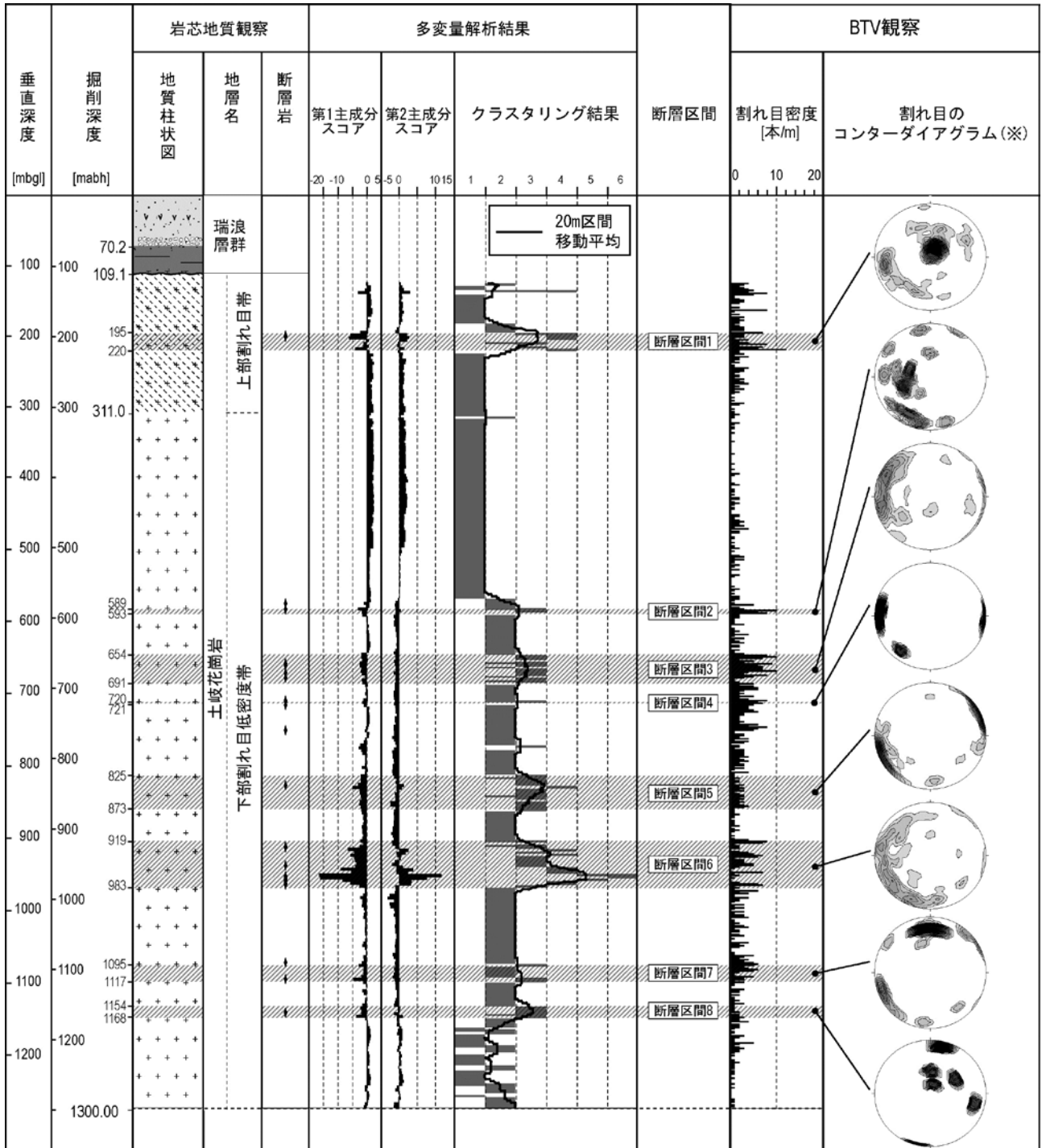
また、MIZ-1号孔近傍における反射法地震探査(三枝ほか, 2007)により得られた解釈断面に、本解析で抽出した断層区間を第10図で重ね合わせた。図より、反射法地震探査からMIZ-1号孔南西側の花崗岩上面に4つの不連続

部が見出されるが、各断層区間で卓越する割れ目の走向傾斜を考慮すると、これらは本解析による断層区間のうち特に規模の大きい4つの延長上に位置していることがわかった(第10図の青色破線)。ゆえに、抽出した断層区間は概ね妥当であると考えられる。以上のように、一定の基準により、断層区間を定量的に判定することで、3次元の地質モデル(例えば、松岡ほか, 2005)を構築する際、ボーリング孔間の解釈結果の齟齬によって生じていた不確実性が低減できるようになる。

さらに、第9図をみると、健岩部に相当するクラスター1と2に関しては、特に掘削深度575m付近を境にして、クラスター1を主体とする区間とクラスター2を主体とする区間とに明確に分かれている。前述のとおりクラスター1と2の岩質は、いずれも新鮮・緻密かつ硬質であり、岩芯の連続性が良い健岩である。しかし、クラスター2の方がやや自然電位が高く、低比抵抗であることから(第6図)、これらは変質程度の微小な差で分類されているものと推定される。特に掘削深度575m以深には、断層区間として判定した箇所が多く、クラスター2に分類された箇所に関しては、弱い変質ではあるものの、広範囲に2次的な変質作用が及んでいることが示唆される。



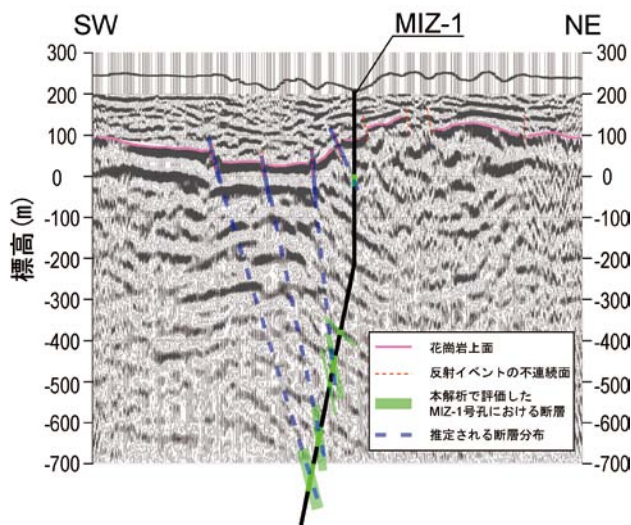
第8図 自己相関分析結果。



断層として判定した区間

(※)BTV観察で観察された割れ目を、シュミットネットの下半球投影で図示、コンターの間隔は1%

第9図 断層区間評価結果を示した柱状図。



第 10 図 反射法地震探査結果と抽出した断層区間の比較。探査測線位置は第 1 図を参照。

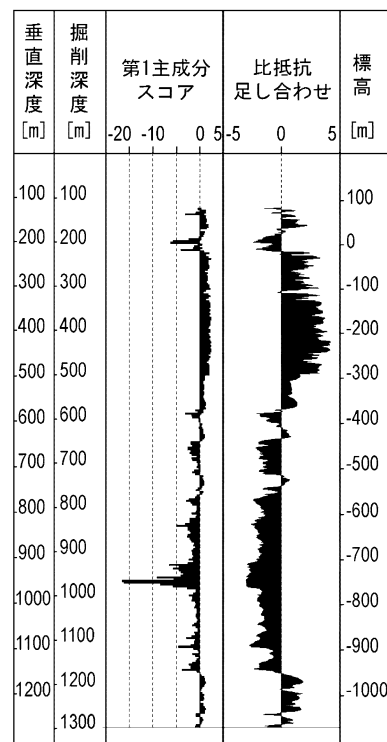
5. 解析手法および結果の検討

5.1 多変量解析の有効性

多くの変数を用いる多変量解析手法の有効性を検証するため、第 1 主成分において主成分負荷量の最も大きい比抵抗検層値のみを用いた解析結果と、本解析結果とを比較した。これにはノルマル法による 2 項目の比抵抗検層値 (SN, LN) を用い、式 (1) によって、それぞれを標準化した。この 2 項目を単純に加算したグラフと、3.1 で選択した 9 項目すべてによる第 1 主成分スコアのグラフを第 11 図に示す。図より、第 1 主成分スコアと比べて比抵抗値は高い値と低い値の 2 極化が顕著であることがわかり、その大小関係から岩盤を 2 つに大別することが可能である。そこで、標準化した 2 項目のみを用いて本解析と同様の手順でクラスタリングを試みた。

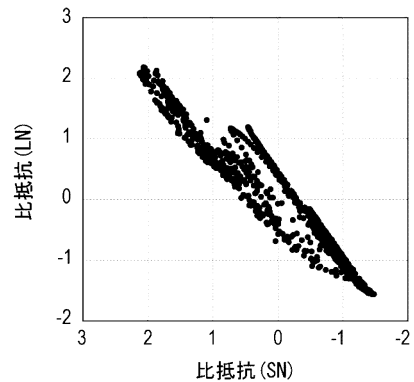
これら 2 項目の散布図、および k 個に分類したクラスターごとに求めた分散の和を第 12 図に示す。散布図は漸移的であるが、分散の合計値の減少が収束する 4 クラスターへの分類を採用した。これによって得られた結果 (第 13 図) より、比抵抗値 2 項目のみを用いたクラスタリングでは、本解析結果と比較して岩盤が適切に区分されていないことが明らかである。

岩盤の比抵抗は含水状況に強く支配される場合が多く (地盤工学会, 1999), 力学的性質は直接反映されていないと考えられる。これに基づけば、比抵抗値のみがもつ岩盤の情報は本解析結果に比べて格段に少なく、クラスタリングでの分類精度が低下することは必然である。よって、単体の調査項目のみを用いた解析よりも、多くの項目を用いる多変量解析手法の方が、分類精度は高く、有効であることが実証できた。

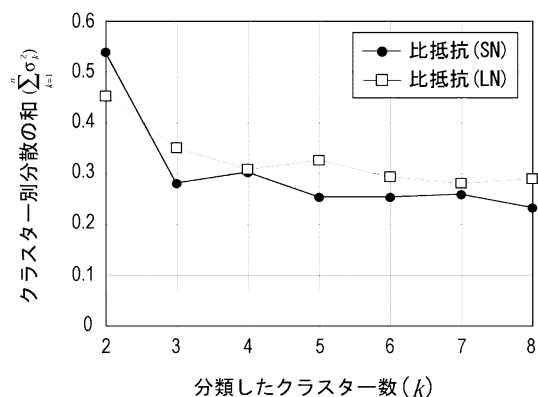


第 11 図 ノルマル法による 2 項目の比抵抗検層値の加算値と第 1 主成分スコアの比較。

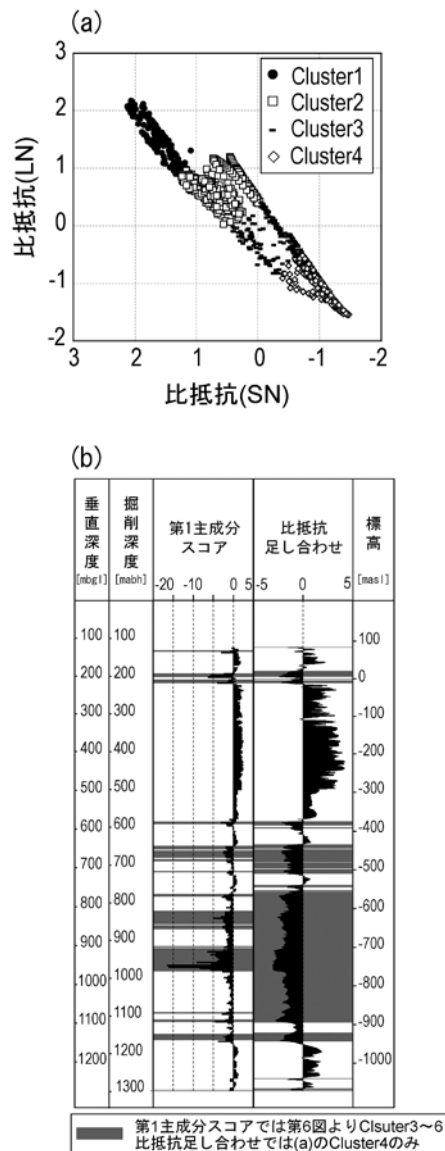
(a)



(b)



第 12 図 (a) 標準化した比抵抗値の散布図, (b) 比抵抗値のみの 2 変数を用いたクラスター分類において、各クラスターでの分散の合計値の変化。



第13図 (a) 比抵抗値2項目でのクラスタリングによる岩盤区分結果, (b) クラスタ区分結果の比較.

5.2 変数の選択

本解析では、地質構造に関連する9項目の調査データを用いたが、本来多変量解析では有用な変数はできるだけ多く用いることが望ましい。これは、5.1の検討結果からわかるように、用いる変数が少なければ情報量が少なくなる上、その質が偏り、クラスタリングの分類精度が大幅に低下することからも明らかである。しかしながら、過去における同様な調査での取得データに欠損がある場合や、今後の計画において調査項目の削減が求められる場合、より少ない変数項目で本解析結果と同等の精度を保つ必要性があり得る。そのためには論理的かつ定量的な指標のもと、重要性に応じて変数項目に優先順位を付けることが不可欠である。

そこで、元の変数全体を最も良く代表する変数項目を優

先順に選ぶことを目的として、森ほか(1993, 2002)を参考に、主成分分析に用いる変数項目を減らしてみた。まず、 p 個の変数を持ち、データ数が n 個の $n \times p$ の行列であるデータセット X が、 q 個の変数をもつその部分行列 X_1 と残りの $p - q$ 個の変数をもつ X_2 で構成されていると仮定する。変数選択は、 X_1 の変数を合成して総合指標をつくったとき、その総合指標が X 全体を最も良く代表するように X_1 を選ぶという問題に帰着する。そのために、MD*Tech 社の統計解析ソフト XploRe を使用して、 $X = (X_1, X_2)$ による一般化固有値問題から r 個の主成分を加算し、この和によって説明される寄与率 P を基準として変数選択を行った。

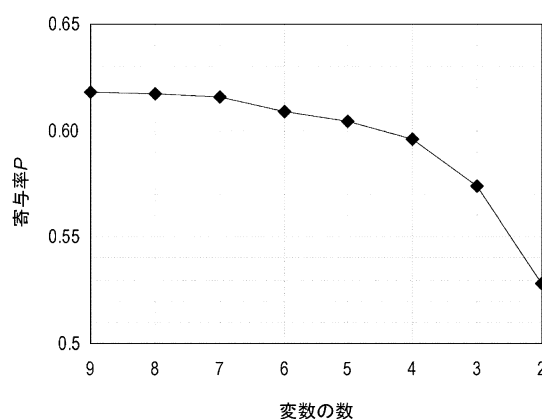
段階的に削除した変数とそのときの P を第3表に、および各計算ステップでの変数選択結果と P の推移を第14図に示す。これらから、ある程度の変数の数までは P の減少は緩やかであるが、それより少なくなると大幅に減少することがわかる。この P は完全に冗長な変数を除いても変化しないという性質を有しているため、各変数の寄与率を明らかにすることで、情報の損失を抑えながら同程度の精度の主成分分析結果が得られるようになる。

全9変数による主成分スコアと、変数の数ごとの第1・第2主成分スコアの散布図を第15図に示す。図より、8変数から7変数、および4変数から3変数へと変数を削減した際には第2主成分軸でデータの散らばる向きが逆転するものの、5変数程度までは全9変数によるデータ分布に見られる屈曲部をもつ特徴的な形状を残すとともに、第1主成分スコア上でデータが適度にばらついていることがわかる。また、それぞれの主成分スコアの相関係数の変化を第16図に示す。図より、相関係数についても5変数以上の場合において第1・第2主成分ともに明らかに高い値を示すことがわかった。

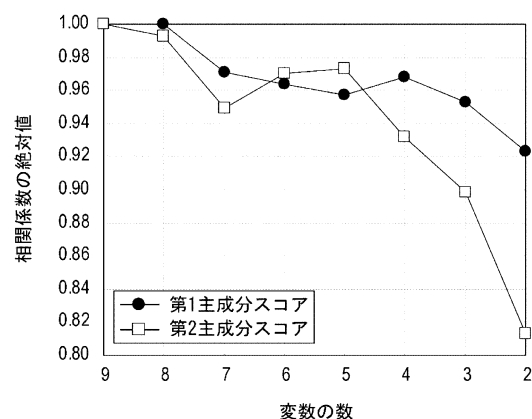
以上の結果から、最後に残った比抵抗 (LN)、音波の2項目と、密度、自然電位、孔径の5変数が本解析では特に重要であり、これらの順で必要度の高いことが明らかとなった。ゆえに、本手法によれば主成分分析で用いるべき変数項目の優先順を評価できることが確かめられた。

第3表 各計算ステップでの変数選択結果と寄与率 P の推移.

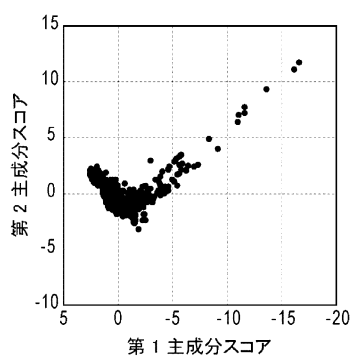
ステップ	変数の数	寄与率 P	削除した変数	寄与率の差
0	9	0.6177	—	0.0000
1	8	0.6175	自然ガンマ	0.0002
2	7	0.6160	比抵抗 (SN)	0.0018
3	6	0.6093	中性子	0.0085
4	5	0.6041	RQD	0.0137
5	4	0.5957	孔径	0.0220
6	3	0.5736	自然電位	0.0441
7	2	0.5284	密度	0.0894



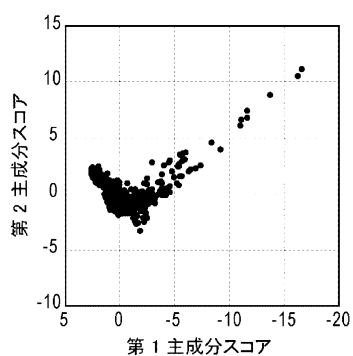
第 14 図 変数選択時の変数の数と、それによる寄与率 P の推移.



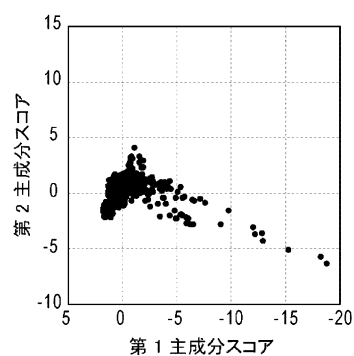
第 16 図 全 9 変数による主成分スコア, および変数を少なくしたことによる主成分スコアの相関係数の推移.



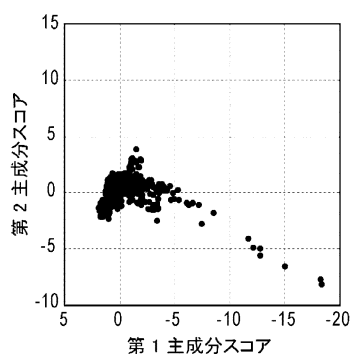
9変数による主成分スコア



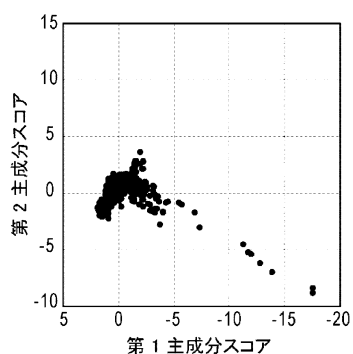
8変数による主成分スコア



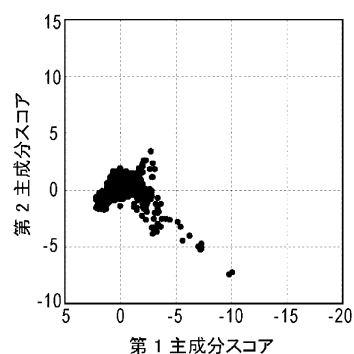
7変数による主成分スコア



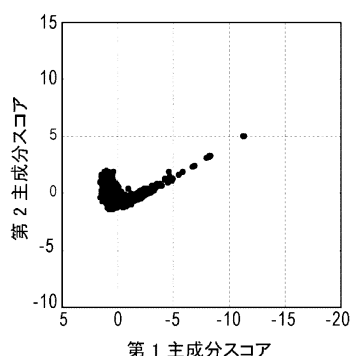
6変数による主成分スコア



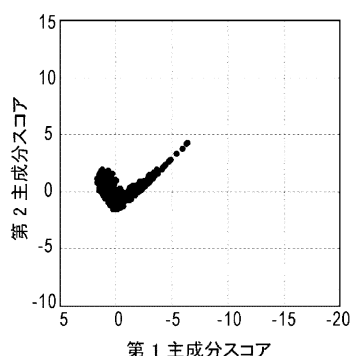
5変数による主成分スコア



4変数による主成分スコア



3変数による主成分スコア



2変数による主成分スコア

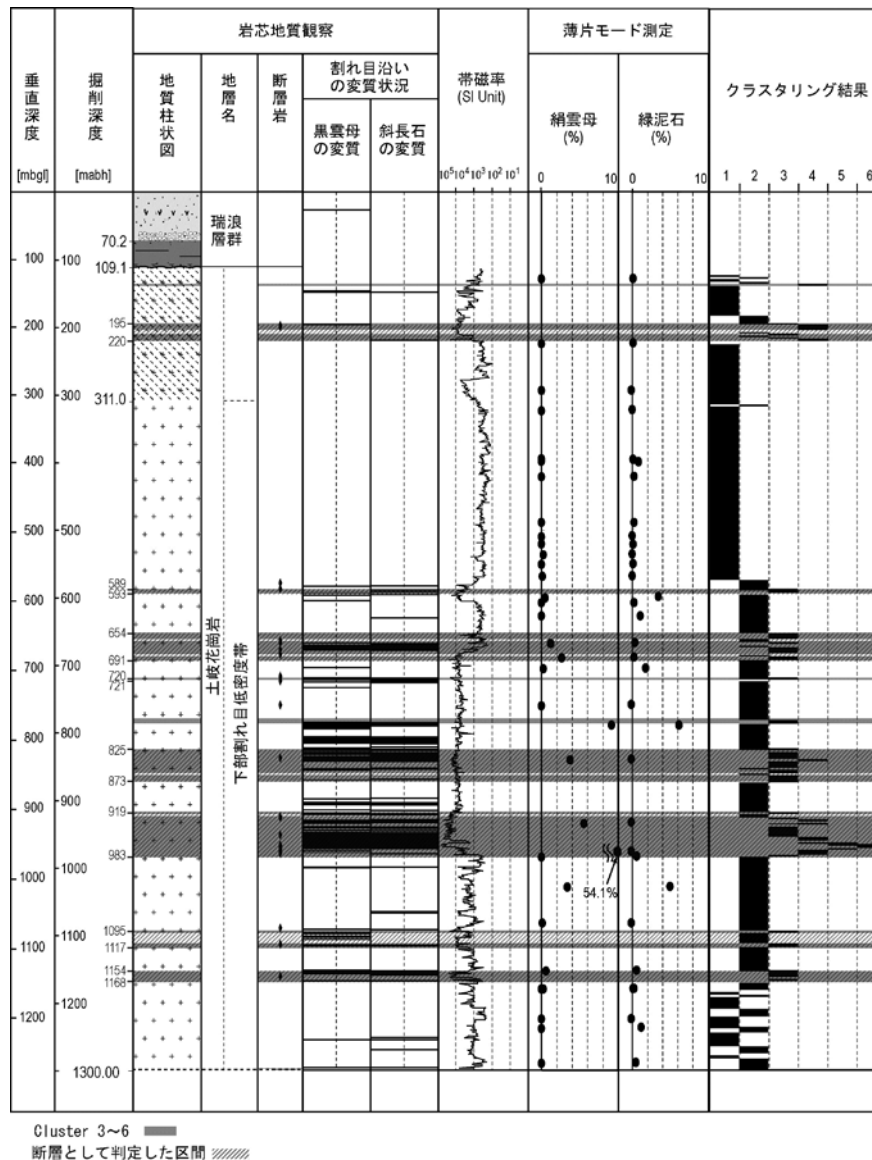
第 15 図 投入される変数の数ごとの主成分スコア散布図.

5.3 クラスタリング結果と変質状況

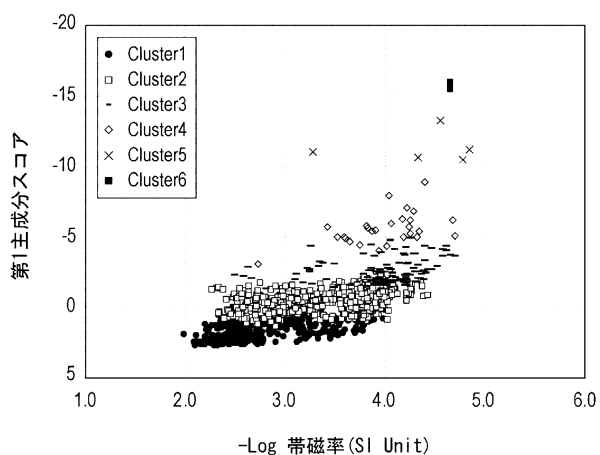
過去の断層運動時に地下水が通った場合や、岩盤中の割れ目が現在も水みちとして機能している場合など、断層区間やその近傍においては地下水との反応による岩石の変質が進んでいることが考えられる。特に、花崗岩中での黒雲母の緑泥石化と斜長石の絹雲母化は熱水を介した一連の化学反応と捉えることができる（西本ほか，2008）。MIZ-1号孔では変質に関する岩芯の観察も行っており、薄片モード測定を33試料（クラスター1～4相当試料）で、さらには帯磁率測定を全深度（岩芯1mおき）で実施している（第17図）。帯磁率は、変質鉱物の生成の有無によって有意な差を表す傾向にあることを歌田（2003）が報告している。本解析結果と帯磁率測定結果は良く対応しており（第18図）、解析区間全体にわたってクラスタリング結果と変質程度には高い関連性があると考えられる。クラスタリング結果と変質状況との関係をさらに明確にするため、薄片

モード測定で確認された変質鉱物（絹雲母と緑泥石）の存在率と薄片試料付近の深度の帯磁率測定値に注目し、これらにクラスタリング結果を加えた（第19図）。図より、変質鉱物の存在率と帯磁率は概ね良く相関し、クラスタリング結果もこれに整合することが明らかである。第20図には、参考としてクラスター別の薄片試料例を示す。図の健岩部と脆弱部それぞれの薄片写真からも、その変質程度の差は明らかである。

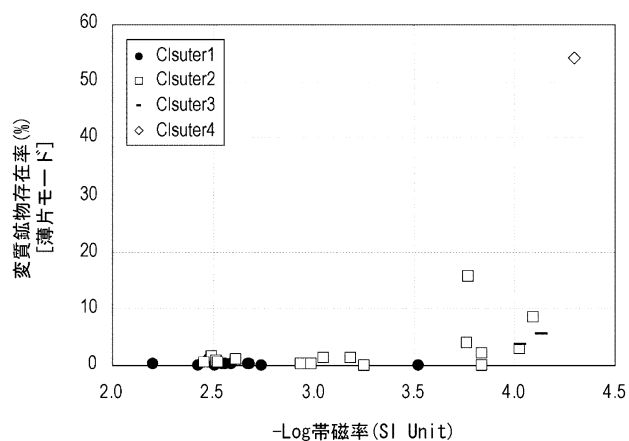
ただし、4.3でも述べたように、本手法が変質程度の微小な差まで区分可能であるということは、断層活動との因果関係が無い（あるいは推定できない）変質帯を自動的に抽出してしまう可能性がある。ゆえに、クラスタリングによる断層区間や岩盤区分結果を活用する過程において、変質の程度・種類や不連続面などの判断に地質技術者の適切な評価・考察が必要となる場合があることは、現時点での課題である。



第17図 評価した断層区間と変質箇所。

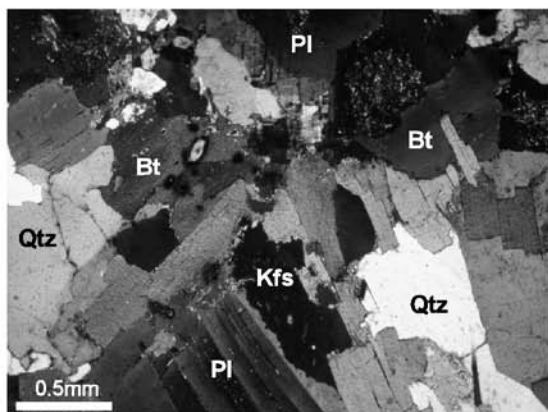


第18図 多変量解析結果と帯磁率.

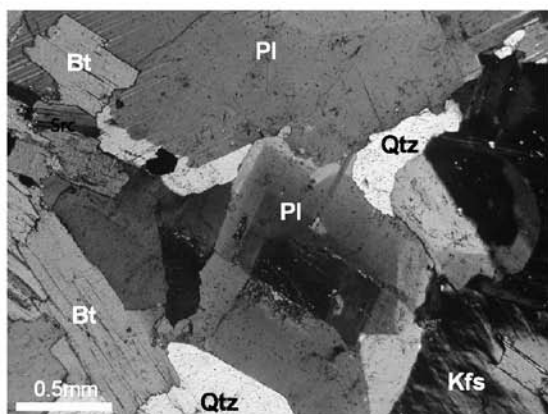


第19図 薄片モード測定結果と帯磁率.

健岩部に分類

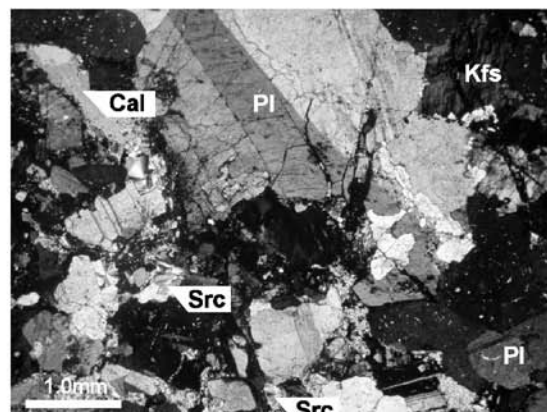


Cluster1: 掘削深度570m付近

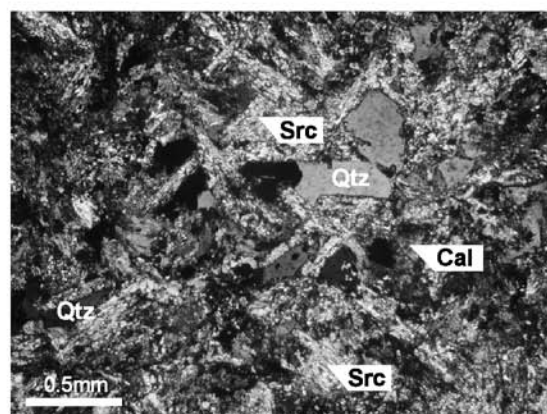


Cluster2: 掘削深度1,180m付近

脆弱部に分類



Cluster3: 掘削深度841m付近



Cluster4: 掘削深度977m付近

Qtz: 石英, Pl: 斜長石, Kfs: カリ長石, Bt: 黒雲母, Src: 絹雲母, Cal: 方解石

第20図 クラスター別の薄片試料例.

5.4 クラスタリング結果と既存岩盤分類

MIZ-1 号孔の岩芯観察では、岩盤の工学的特性を評価するための指標として、地質調査で一般的に用いられる田中 (1964) の分類を簡素化した岩盤区分 (以下、既存岩盤分類と記す) を適用している (Nakano *et al.*, 2003). 本研究ではこれを発展させ、物理検層データから推定した一軸圧縮強度と岩盤分類結果、あるいはクラスタリング結果との相関性を比較することにより、多変量解析による岩盤区分の妥当性を検証した。

まず、平野ほか (2009) により実施された MIZ-1 号孔の一軸圧縮試験と、物理検層による P 波速度値 (本解析に使用した 1 m おきのデータ中で当該深度のデータ) の関係を求めた (第 21 図). 図中の実線は井上・大見 (1971) による次の関係式を表し、それは火成岩と第三紀以前の堆積岩による一軸圧縮試験値と P 波速度とのデータから得られたものである。

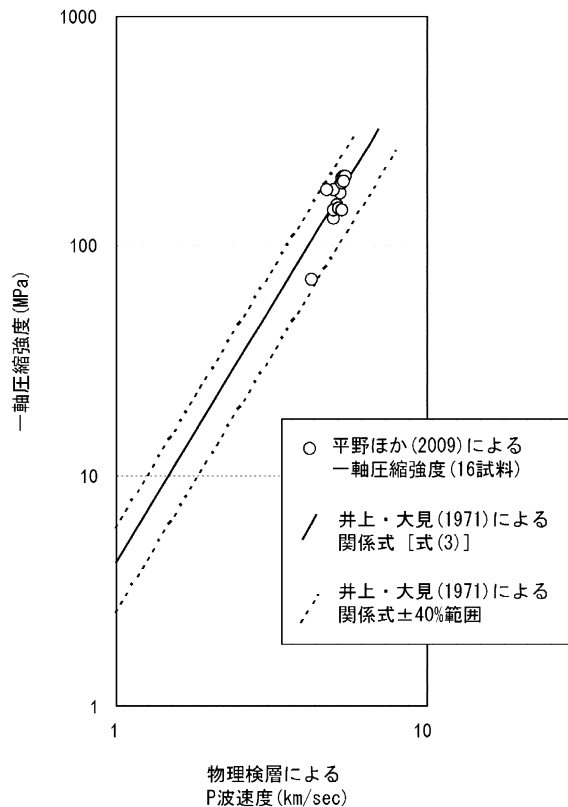
$$\sigma_c = 43 V^{2.23} \quad (3)$$

ここで、 σ_c は一軸圧縮強度、 V は P 波速度を表す。

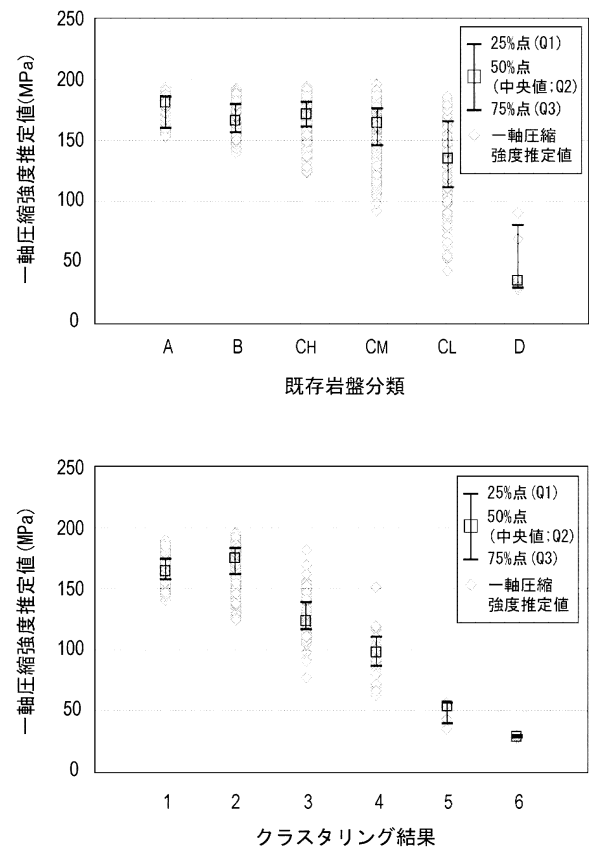
井上・大見 (1971) では、データのほとんどが上の関係式の $\pm 40\%$ 以内 (第 21 図破線) に収まるとしている。MIZ-1 号孔データにおいてもその傾向は当てはまる。そこで式(3)を用いて、物理検層による P 波速度値から MIZ-1

号孔の全解析深度 (総延長 1,174 m) の一軸圧縮強度を 1 m 間隔で推定し、その推定値 (以下、強度推定値と記す) と既存の岩盤分類結果、および本研究によるクラスタリング結果とを比較した (第 22 図)。

第 22 図において、25% 点・50% 点・75% 点は積算頻度分布 (その値以下に何パーセントのデータがあるか) を表し、それぞれ第 1 四分位数 (Q1)、第 2 四分位数 (Q2)、第 3 四分位数 (Q3) を意味する。Q2 は中央値 (メディアン) であり、Q1 から Q3 までの四分位範囲には相対的に信頼性が高く、分布を特徴付ける重要なデータが 50% 含まれている。第 22 図より、既存岩盤分類においては、各等級における中央値に明瞭な差が見られない場合が多く、隣接する区分間で強度推定値全体、およびその四分位範囲の重複が大きいことがわかる。一方で、クラスタリング結果においては、強度推定値の中央値の差は各区分間で大きいとともに、隣接する区分間における強度推定値全体の重複は既存岩盤分類よりも少なく、特に各四分位範囲に関しては健岩部以外の隣接する区分間において明確に異なっている。これらの結果は、本手法が岩盤を適切に区分できる有効な手段であることを裏付けている。以上により、クラスタリング結果は、新たな指標として、より定量的な岩盤評価に適用できると考えられる。



第 21 図 一軸圧縮強度と P 波速度との関係。



第 22 図 一軸圧縮強度の推定値と既存岩盤分類およびクラスタリング結果との比較。

6 . まとめと今後の課題

本研究では、多変量データ解析に広く用いられている主成分分析およびクラスタリングをボーリング調査による数値データに適用することで、客観的な基準により岩盤を高精度で区分し、断層区間を適切に判定することができた。解析の際には、使用する変数を明確な基準で選定することにより、既往の研究と比較して多変量解析の客観性を向上できた。これらにより、多種情報を一度に扱う多変量解析は、一つの調査項目のみに注目した従来の解析に比べて有効な手法であることが実証できた。また、主成分分析に用いた変数の優先順を論理的かつ定量的な指標のもとに評価することが可能なことや、本手法が岩石の変質程度の微小な差まで区分できる可能性があることを明らかにした。本解析によって得られた結果は、岩芯観察結果をはじめとして、その岩芯を使用した測定・分析結果や物理探査結果など、他の調査結果とも整合した。ゆえに、本手法は、3次元地質モデルの構築や、それに引き続く構造物の設計・施工、地下水流動解析などに貢献でき、それらに有用な地下の地質環境に関する情報や、工学的情報を提供することが可能である。

ただし本手法では、断層区間に加えて、断層活動との因果関係が推定できないような、いわゆる変質帯のような箇所も抽出される可能性がある。そのため、クラスタリングによる岩盤区分結果を評価する過程で、変質の程度・種類や不連続面などに関する地質技術者の適切な判断・考察が必要となる場合があることが現時点での課題である。よって、今後は本手法を多くのボーリング孔データに適用することにより、主成分の解釈方法を標準化できるようにするとともに、評価精度を高めるための新たな地質情報や計測データを必要に応じて取り入れつつ、本手法における解析から評価までの一連の作業内容や流れを体系化していくことが必要である。

さらに、小池ほか(2008)や栗原ほか(2008)のように、ボーリング孔データからの地質構造の面的・空間的な広がり、推定、および局所的に発達する地質構造の特徴やその発達過程と、それに関連した岩盤の水理特性を詳細に解析することにより、対象地域の深部地質環境に関する理解は、今後深化していくはずである。そのため、調査対象の地質環境特性やその他の制約条件(現場データの取得方法や評価スケール)に応じて、選択する変数の数や組み合わせ、あるいは解析単位(本解析では1 m単位)を柔軟に改良していくことで、評価結果の不確実性を低減させ、手法のさらなる汎用性を高めていくことが求められる。

謝辞: 査読者からは論文全体にわたり詳細で的確な査読意見をいただき、これらは論文の改善に大いに役立った。ここに記して深甚の謝意を表したい。

文 献

- Caine, J. S., Evans, J. P. and Forster, C. B. (1996) Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*, vol.24, no.11, pp.1025-1028.
- Deere, D. U., Hendron, A. J., Patton, F. D. and Cording, E. J. (1967) Design of surface and near-surface construction in rock. *Proc. The 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*, pp.237-302.
- 平野 享・中間茂雄・山田淳夫・瀬野康弘・佐藤稔紀 (2009) 超深地層研究所計画(岩盤力学に関する調査研究) MIZ-1号孔における岩盤力学調査. JAEA-Research 2009-031.
- 井上正康・大見美智人 (1971) 岩石供試体の縦波伝播速度と一軸圧縮強さとの関係. *応用地質*, vol.12, no.3, pp.136-141.
- 石原舜三・鈴木淑夫 (1969) 東濃地方ウラン鉱床の基盤花崗岩類. *地質調査所報告*, no.232, pp.113-127.
- 伊藤久男・桑原保人・宮崎光旗・西沢 修・木口 努・藤本光一郎・大谷具幸・田中秀実・樋口孝幸・AGAR Susan・BRIE Alain・山本裕祥 (1996) 断層を貫く坑井調査による野島断層の深部構造. *物理探査*, vol.49, no.6, pp.522-535.
- 糸魚川淳二 (1980) 瑞浪地域の地質. 瑞浪市化石博物館専報, no.1, pp.1-50.
- 地盤工学会 (1999) 地盤工学ハンドブック. pp.377.
- 神宮英夫・土田昌司 (2008) わかる・使える多変量解析. ナカニシヤ出版, pp.18.
- 核燃料サイクル開発機構 (2005) 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ— 一分冊1 深地層の科学的研究— JNC TN1400 2005-014, 付録-1 (3) .
- 金折裕司 (2001) 断層の影響はどこまで及んでいるか. *応用地質*, vol.41, no.6, pp.323-332.
- 菅 民郎 (2001) Excelで学ぶ多変量解析入門. オーム社, pp.190.
- 小池克明・劉 春学・天野健治・栗原 新 (2008) 広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証: 東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディ. *Journal of MMIJ*, vol.124, no.12, pp.700-709.
- Korkealaakso, J., Vaittinen, T., Pitkänen, P., and Front, K. (1994) Fracture Zone Analysis of Borehole Data in Three Crystalline Rock Site in Finland—The Principal Component Analysis Approach. YJT-94-11, Helsinki, Finland, Nuclear Waste Commission of Finnish Power.
- 小坂和夫 (1998) 水みちとしての断層と節理—構造地質学から応用地質学へ—. *地質学論集*, no.50, pp.251-263.
- 栗原 新・天野健治・劉 春学・小池克明 (2008) 花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈—瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見. *Journal of MMIJ*, vol.124, no.12, pp.710-718.

- Lindqvist, L., Thunehed, H. (2003) Oskarshamn Site Investigation: Calculation of Fracture Zone Index (FZI) for KSH01A. P-03-93, Stockholm, Sweden, SKB.
- Lindqvist, L., Thunehed, H. (2004) Oskarshamn Site Investigation: Calculation of Fracture Zone Index (FZI) for HSH01. P-04-26, Stockholm, Sweden, SKB.
- 松岡稔幸・熊崎直樹・三枝博光・佐々木圭一・遠藤令誕・天野健治 (2005) 繰り返しアプローチに基づく地質構造のモデル化 (Step1およびStep2). JNC TN7400 2005-007.
- 森 裕一・飯塚誠也・垂水共之・田中 豊 (2002) VASMM (Variable Selection in Multivariate Methods). <http://mol61.soci.ous.ac.jp/vasmm/>, 最終アクセス日 H22.8.27.
- 森 裕一・垂水共之・田中 豊 (1993) 変数の一部を用いた総合指標の抽出. 日本計算機統計学会シンポジウム論文集, no.8, pp.16-19.
- Nakano, K., Amano, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Saegusa, H., Hama, K., Kumazaki, N., Iwatsuki, T., Yabuuchi, S. and Sato, T. (2003) Working Program for MIZ-1 Borehole Investigations. JNC TN7400 2002-008.
- 西本昌司・鶴飼恵美・天野健治・吉田英一 (2008) 地下深部花崗岩の変質プロセス解析—土岐花崗岩を例にして—. 応用地質, vol.49, no.2, pp.94-104.
- Okko, O., Front, K. and Anttila, P. (2003) Low-angle fracture zones in rapakivi granite at Hästholmen, southern Finland. *Engineering Geology*, vol.69, pp.171-191.
- Olsson, O. (ed.) (1992) Site Characterization of Validation Project - Final Report. SKB Technical Report TR-92-22, SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- 小村健太郎・池田隆司・飯尾能久・新井崇史・小林健太・島田耕史・田中秀実・富田倫明・平野 聡・松田達生 (2001) 野島断層平林NIED井破碎帯部の物理検層からみた特徴. 防災科学技術研究所研究報告, 第61号, pp.155-171.
- 小村健太郎・池田隆司・飯尾能久・新井崇史・小林健太・島田耕史・田中秀実・平野 聡・松田達生 (2003) 断層破碎帯部の物理検層—野島断層平林NIED井の場合—. 物理探査, vol.56, no.6, pp.401-414.
- Ota, K., Takeuchi, S., Ikeda, K., Amano, K., Matsuoka, T., Iwatsuki, T. and Yabuuchi, S. (2005) Overview of the MIZ-1 Borehole Investigations. JNC TN7400 2005-024.
- 三枝博光・瀬野康弘・中間茂雄・鶴田忠彦・岩月輝希・天野健治・竹内竜史・松岡稔幸・尾上博則・水野 崇・大山卓也・濱 克宏・佐藤稔紀・久慈雅栄・黒田英高・仙波 毅・内田雅大・杉原弘造・坂巻昌工 (2007) 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第1段階) 研究成果報告書. JAEA-Research 2007-43.
- 佐々木圭一・天野健治 (2004) 物理検層結果による割れ目帯の評価. 日本応用地質学会平成16年度研究発表会講演論文集, pp.247-250.
- 新納浩幸 (2007) Rで学ぶクラスター解析. オーム社.
- 田中治雄 (1964) 土木技術者のための地質学入門. 山海堂, pp.28-36.
- 田中和広・井上大栄 (1995) 断層の定義, 考え方. 土と基礎, vol.43, no.3, pp.11-14.
- 魚住直己・村上真也・大石保政・河村秀紀 (2005) 超深地層研究所計画における試錐調査 (MIZ-1). JNC TJ7440 2005-091.
- 歌田 実 (2003) 六甲花崗岩類の変質作用—鉱物変化と帯磁率変化—. 地学雑誌, vol.112, no.3, pp.360-371.
- 吉村辰郎 (2005) 破碎幅から読み取る野島断層活動史: 自然ガンマ線検層の活用. 日本地質学会学術大会講演要旨, vol.112, pp.138.

要 旨

多変量解析を用いたボーリング孔での断層の区間判定と岩盤区分
—瑞浪超深地層研究所における深層ボーリング孔での事例—

鑑 顕正・天野健治・小池克明・鶴田忠彦・松岡稔幸

岩盤中の断層区間は、地下の地質環境や地盤の工学的性能を評価する際の重要な要素の一つである。しかしながら、ボーリング調査では様々な制約により、常に同じ品質や量のデータが確保できるとは限らず、諸条件によって評価結果が異なる可能性がある。そうした評価結果の差異は、地質環境を理解していく過程での不確実性の増大につながり、その後の計画立案時における適切な意思決定を難しくするだけでなく、直接的な施工のリスク要因にもなる。そのため本研究では、岐阜県瑞浪市でのボーリング調査データを用いて、使用する変数を明確な基準で選択した上で、多変量解析（主成分分析およびクラスタリング）を適用した。その結果、客観的な基準により、岩盤を高精度で区分し、断層区間を適切に判定できるようになった。これにより、一つの調査項目のみに注目した従来の解析に比べ、多種情報を一度に扱う多変量解析は有効な手法であることが実証された。

キーワード：断層区間，岩盤区分，多変量解析，ボーリング調査