

## 74. 多変量解析を利用した断層分布区間の判定

## Estimation of Fault Zone Intervals by Multivariate Analysis

○鑑 顕正, 天野 健治(日本原子力研究開発機構)  
Kensho Abumi, Kenji Amano

## 1. はじめに

地下構造物の建設工事をはじめとする多くの応用地質学的調査においては, 地下水の流動を規制し, かつ岩盤の力学的安定性に大きく影響する可能性のある破碎部や変質部を伴う断層区間を正確に把握することが地質技術者に求められる. しかしながら, ボーリング調査など情報が限られた条件下での断層分布区間の認定は容易ではなく, 特に主要せん断面から離れた領域におけるその影響区間の判定は, 得られたデータの質・量のみならず, 地質技術者の知識や経験差などに大きく左右される. 本研究では, これらの課題解決を目的に, 既存ボーリング孔における岩芯観察結果と物理検層値を変数とした多変量解析を導入し, 断層分布区間を客観的に判定することを試みた.

## 2. 過去の解析事例と本解析手法

ボーリング孔において, 割れ目本数や RQD などの地質観察から得られるデータは, 単独で用いてもある程度の岩盤評価を行う上での指標となり得る. また, 特定の検層値が異常を示している区間は, 断層に伴う破碎部や変質部などを反映している可能性が高い. しかしながら, 地質観察データは岩盤の物性値に影響を与える区間を必ずしも反映しているとは限らず, また, ある特定の検層項目で評価を行った場合は, 評価結果にその項目固有のバイアスが反映されてしまう可能性がある. よって, それらのデータを同時にかつ統計学的に処理することで結論を導く多変量解析手法を用いた評価が有効と考えられる. 小村ほか(2003)<sup>1)</sup>は, 物理検層結果に, 健岩部と破碎・変質部などの間には顕著な相違が認められることを示した. Olsson(1992)<sup>2)</sup>は複数の検層値などを用いた主成分分析を行い, 第1主成分得点から割れ目帯と健岩部を区分している. また, 佐々木・天野(2004)<sup>3)</sup>は, 割れ目密度と各検層値により得られた第1主成分得点から, 健岩部を正規分布とし, その外れ値の算出指標を用いて割れ目帯の評価を行っている. ただし, これらの報告には, 割れ目帯の設定基準に統計学的根拠が乏しいこと, 断層区間の解釈を行っていないことなどの技術的な問題があげられていた. そのため本研究では, 主成分分析に加えクラスター分析(似たような値を示す箇所が同じクラスターに属するよう統計学的アルゴリズムによりグルーピングを行なう手法)を用いた多変量データの客観的分類を行うとともに, 断層分布区間の判定を行った.

## 3. ボーリング孔の概要

本解析の対象とした MIZ-1 号孔は, 日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所用地内に掘削したボーリング孔である. MIZ-1 号孔周辺の地質は, 下位より本地域の基盤をなす後期白亜紀の花崗岩(土岐花崗岩), 新第三紀中新世の瑞浪層群, 固結度の低い新第三紀中新世以降の瀬戸層群(ともに堆積層)が分布する(図-1). MIZ-1 号孔では, 地表から深度 109.14m までは瑞浪層群が, 深度 109.14m から孔底(深度 1,300.00m)までは土岐花崗岩が分布している. 土岐花崗岩は主に中粒~粗粒の黒雲母花崗岩からなり, 顕著な破碎・変質区間が一部見られる.

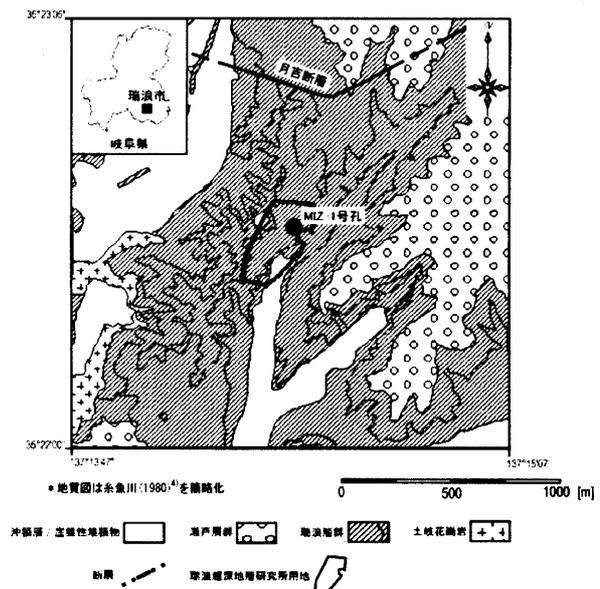


図-1 調査地周辺の地質図

## 4. 断層分布区間の判定方法

説明変数として採用するデータは, 深度方向に連続的かつ定量的に取得されていることが望ましい. 本解析では, 花崗岩が分布する区間(掘削深度: 109.14~1,300.00m)における, 密度検層, 孔径検層, 中性子検層(地層空隙率に換算), 音波検層(P波速度), および BTV 観察により求めた 1m あたりの割れ目密度データに RQD データを加えた 6 変数を採用した. 電気検層に関しては, 岩盤の破碎の程度以上に他の様々な要因(孔内水の比抵抗, 地層水の電通度や飽和度など)の影響を受ける<sup>5)</sup>ため, 佐々木・天野(2004)同様使用しないこととし

た。以下に簡単な解析手順を示す。

- ① 10cm 毎に測定した密度・孔径・中性子・音波検層のデータから 1m 深度ごとの平均値を算出する。また、BTV 観察より 1m 深度ごとの割れ目の本数を算出する。
- ② ①で算出した 5 変量に RQD を加えた多変量で主成分分析・クラスター分析を行い、ボーリング孔データでの岩盤性状に関する分類を行う。
- ③ 第 1 主成分得点グラフのスムージングによりデータの傾向を把握することで、断層分布区間の判定を行う。

5. 結果および考察

本解析結果を反映した柱状図を図-2 に示す。なお、本解析における主成分分析・クラスター分析には、SAS 社の探索的データ分析ソフト JMP<sup>®</sup>を使用した。

(1) 主成分分析・クラスター分析結果

本解析では、まず主成分分析を行い、変量間の関係性を確認した。主成分分析結果を表-1 に示す。表より、第 1 主成分負荷量は各検層が極めて大きく、第 2 主成分負荷量は割れ目密度が極めて大きい。RQD はどちらの主成分でも同程度の負荷量である。これは、第 1 主成分得点の差は主に検層値全体の大小を表し、第 2 主成分得点は、割れ目の多さの指標となることを表す。また、RQD は第 1・第 2 主成分両方で同程度に比較的良く相関している。今回の解析では、この第 1 主成分(主

に物理検層の結果)と第 2 主成分(主に割れ目密度, RQD の算出結果)を使用し、岩盤性状を区分するための k-means 法によるクラスター分析を行った。

健岩部とアノマリ (健岩部とは異なる値を示し、地質学的には破砕部や変質部などであると考えられる箇所) に分類することを目的としてまず、2 つのクラスターに分類する(図-3)。

表-1 主成分分析結果

|        |           | 第 1 主成分 | 第 2 主成分 |
|--------|-----------|---------|---------|
| 固有値    |           | 2.91    | 1.24    |
| 寄与率    |           | 48.54   | 20.73   |
| 累積寄与率  |           | 48.54   | 69.24   |
| 因子負荷量  | 密度        | 0.79    | 0.33    |
|        | 孔径        | -0.77   | -0.30   |
|        | 中性子(空隙率)  | -0.75   | -0.25   |
|        | 音波(P 波速度) | 0.83    | -0.06   |
|        | 割れ目密度     | -0.16   | 0.89    |
| 固有ベクトル | RQD       | 0.65    | -0.50   |
|        | 密度        | 0.46    | 0.30    |
|        | 孔径        | -0.45   | -0.28   |
|        | 中性子(空隙率)  | -0.44   | -0.02   |
|        | 音波(P 波速度) | 0.49    | -0.07   |
|        | 割れ目密度     | -0.10   | 0.80    |
|        | RQD       | 0.38    | -0.42   |

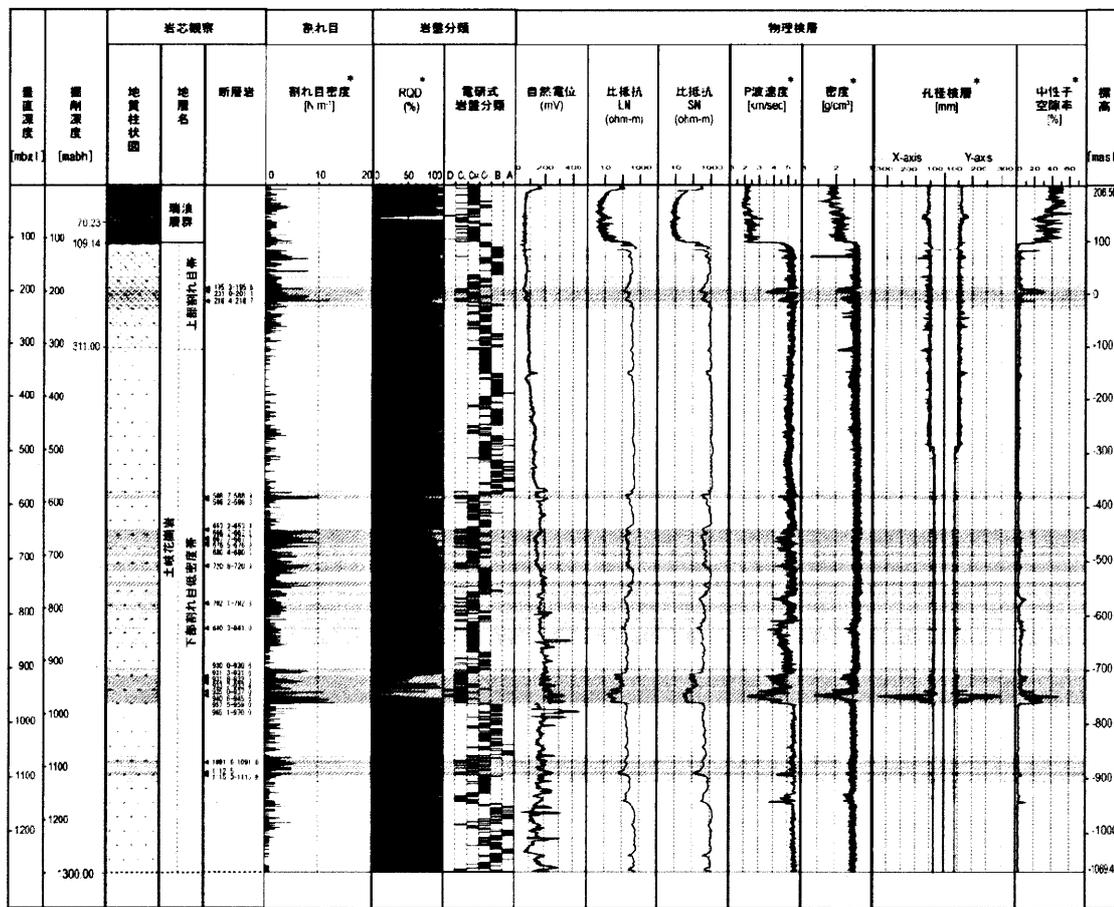


図-2 総合柱状図

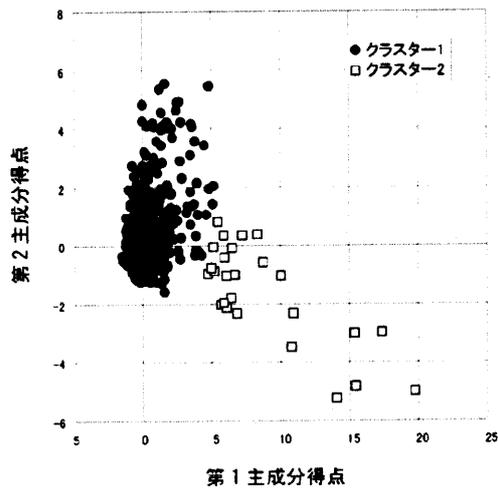


図-3 クラスタ分析結果(2クラスター)

表-1より、密度・P波速度と空隙率・孔径値、あるいは割れ目密度とRQDは互いに逆相関の関係にあることが分かる。例えば、地層の密度が大きければ空隙は少なく、また割れ目が少なければRQDは高くなることになり、これは論理的にも整合する。図-3では第1主成分軸は良く分類されているが、第2主成分軸が分類できていない。そのため、今度は3つのクラスターに分類してみる。結果を図-4に示す。

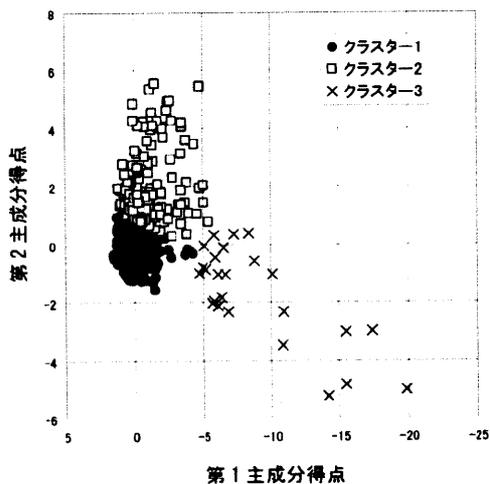


図-4 クラスタ分析結果(3クラスター)

図-4から、クラスター1に分類されたデータは第1主成分得点が高く、第2主成分得点が高い。つまり、密度・P波速度値が高く、空隙率・孔径値が低くかつ、低割れ目密度、高いRQD値の箇所が集中しているため、健岩部を表しているといえる。クラスター2は、第2主成分得点が高い値を示す箇所、主に割れ目が多く、RQDが低い箇所である。クラスター3は、逸水・崩壊防止セメンチングなどの理由によりBTVによる割れ目算出が十分に行えなかった箇所であり、そのため割れ目密度は少なく算出されているが、その他の変量が顕著な異常値を示している箇所であると考えられる。よって、クラスター2および3は地質学的には破碎部や変質

部などを表していると考えられる。今回の解析では、この3クラスターに分類した結果を採用する。アノマリとして67区間(区間合計179m)が抽出され、割れ目密度は全体平均(1.4本/m)と比較して4.0本/mと有意に高い。アノマリの抽出結果を図-2に示す。これらの区間は、断層ガウジや断層角礫などの脆弱な断層岩が観察されている箇所を全て含むことや、岩盤分類<sup>6)</sup>で例えば本解析孔におけるA・B級岩盤の99%が健岩区間に、全てのD級岩盤がアノマリに分類されていることなどから、地質学的データとも概ねよく対応する(図-2)。また、抽出結果(1m単位)をヒストグラム化したものを図-5に示す。第1・第2主成分共に明らかな外れ値は全てアノマリに分類されている。

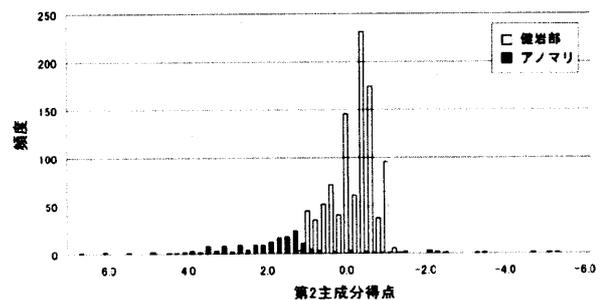
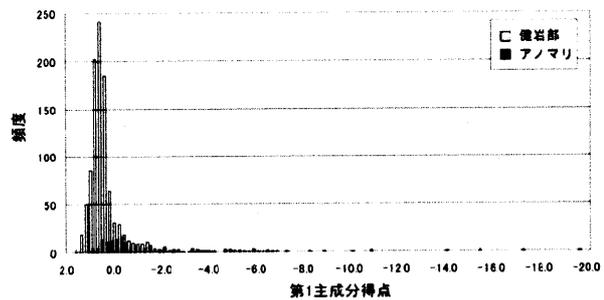


図-5 クラスタ分類結果ヒストグラム

## (2) データのスミージングによる断層分布区間の決定

これまでの定性的評価では、評価者によってボーリング孔毎に断層区間の解釈基準が異なる場合があり、地質構造を3次元モデル化する際<sup>7)</sup>などに、全体的な解釈結果の整合性に問題が生じることも多かった。特定の検層や割れ目密度など各々のデータのグラフの傾向からは、破碎やそれに伴う変質が進んでいると考えられる区間は目視で把握することができる(図-2)。当然クラスター分析によりアノマリはそのような区間に集中して抽出されるが、それら集中部は断層とそれによる影響区間を表している可能性が高い。しかしながら、個々のデータから目視で評価するには1m毎の値の変化は激しく、その区間設定は容易ではない。従来はそれに加えて地質技術者の経験や知識を駆使した岩芯観察などが行われるのであるが、今回の解析では、本来、測定波形のノイズ除去などに使われる離散フーリエ変換を用いることにより第1主成分得点グラフのス

スムージングを行い、データのおおまかな傾向をつかむことで、断層およびその影響区間の客観的かつ定量的な評価を試みた。細かなデータの変化をノイズとして取り去ることでスムージングされたグラフから、一つの山を1セクションとして、主成分得点における曲線のトレンドにより、アノマリが集中している部分あるいは健岩部が続く部分の区間分けを行った(図-6:左図)。同区間内で抽出されたアノマリをまとめることにより、断層分布区間を設定する。今回の解析では、断層岩(断層角礫・断層ガウジ)が観察されている区間に限定して、抽出されたアノマリを断層分布区間として評価した(図-6:右図)。

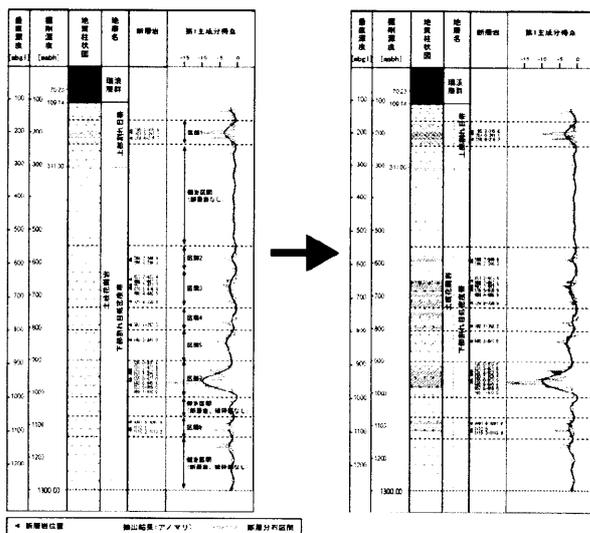


図-6 第1主成分得点のスムージングと断層分布区間の判定

まとめられた区間は、検層値の傾向はもとより(図-2)、割れ目密度、岩芯観察結果における母岩の変質が顕著な区間とも概ね対応する(図-7)。ただし、解析手法上の問題として、例えば活動時期の全く異なる断層区間が複数混在している区間などでも、アノマリは一樣に抽出されてしまうため、純粋な細分化や評価は難しいことや、スムージング時に遮断する波長の決定方法などに課題を残しており、それらの解決と、さらなる地質学的データ(例えば、化学分析データや応力データなど)との整合性の確認が必要であるといえる。

6. まとめ

物理検層のデータ(密度、孔径、地層空隙率、P波速度、割れ目密度)およびRQDデータといった数値データを使用して多変量解析手法を用いた統計学的処理により、断層分布区間を客観的に抽出することができた。また、これらの区間は、断層岩位置や岩盤等級、あるいは母岩の変質状況などの岩芯観察データと対比した結果、良く対応することから、本手法は断層分布区間

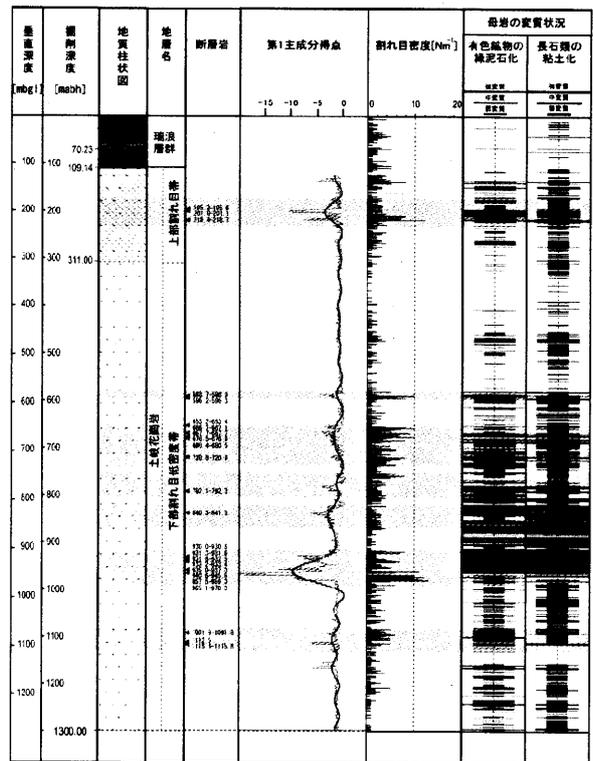


図-7 断層分布区間評価結果

の範囲の決定に有効であると考えられる。ただし、解析手法上の課題解決と細かな地質学的データとの整合性に関してはさらなる確認が必要であり、今後は地質学的データの収集および整合性の確認と平行して、解析手法の改善を行い、さらには、今後の調査研究における調査項目の最適化や評価手法の効率化に反映していきたい。

参考文献

- 1) 小村健太郎ほか(2003):断層破碎帯部の物理検層,物理探査, vol.56, no.6, pp.401-414
- 2) Ollson O., ed. (1992): Site characterization and validation - final report: Stripa Project TR 92-22, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- 3) 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.
- 4) 糸魚川淳二(1980):瑞浪地域の地質,瑞浪市化石博物館専報, no1, pp.1-50
- 5) 物理探査学会(1998):物理探査ハンドブック, 13章, pp.635-709
- 6) 土木学会(1989):土木工学ハンドブック, pp.405
- 7) 松岡稔幸ほか(2005):繰り返シアプローチに基づく地質構造のモデル化(Step1 および Step2), サイクル機構技術資料, JNC TN7400 2005-007