



日本原子力研究開発機構機関リポジトリ
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別；線形判別分析による試み
Author(s)	立石 良, 島田 耕史, 清水 麻由子, 植木 忠正, 丹羽 正和, 末岡 茂, 石丸 恒存
Citation	応用地質, 62(2), p.104-112
Text Version	出版社版
URL	https://jopss.jaea.go.jp/search/servlet/search?5068907
DOI	https://doi.org/10.5110/jjseg.62.104
Right	日本応用地質学会



Japan Atomic Energy Agency

断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別 —線形判別分析による試み

立石 良*・島田 耕史**・清水麻由子***・植木 忠正****・丹羽 正和**・
 末岡 茂***・石丸 恒存***

Key words: 断層ガウジ Fault goudi, 活断層 Active fault, 化学組成 Chemical composition, 線形判別分析
 Linear discriminant analysis

1. はじめに

活断層の認定, すなわち最近の地質時代における断層活動の検出は, 一般に地形判読やトレンチ調査, 反射法地震探査などに代表される変動地形学的手法によりなされる¹⁾. このような調査は活断層の運動に伴う第四紀後期の地形面あるいは地層の変位・変形を前提としており, 段丘や堆積層の分布が乏しい地域や, 侵食や人工改変によりこれらの証拠が残っていない場合には適用できない. こうした場合に活断層を認定する方法として, 1) 断層の最新活動面を横断する鉱物脈の性状と年代で判断する方法²⁾, 2) 最新活動面におけるMn鉱物の濃集に着目した方法³⁾, 3) 断層岩の性状とその生成深度, および最新活動面の変位センスと現在の広域応力場とを比較する方法⁴⁾が提案されている. しかし, 1) は鉱物脈が, 2) はMn鉱物が確認されない場合に, 3) は過去の広域応力場が現在と類似する場合に判断を誤る可能性があり, 少なくとも現段階では, 十分に確立された方法とは言えない.

第四紀後期の地形や地質に依らずに活断層を認定するには, 断層の物理学的・化学的性質に着目し, 活断層と既に活動を終えた断層(ここでは非活断層と呼ぶ)の違いを見出す必要がある. 両者の大きな違いは, 最新活動後の経過

時間であり, 活断層が 10^0 年から 10^4 年オーダーであるのに対して, 非活断層は 10^5 年以上である. 従って, 断層活動と同時に生じる物理学的・化学的現象は両者とも同じであったとしても, その後の断層活動休止期間のプロセスは大きく異なる可能性がある. 前述の方法もこうした考えに基づいていると見なせるが, いずれも断層活動休止期間に生じるイベント的な現象を扱っており, 断層の最新活動後の時間的経過とともに累積的に生じる変化は対象としていない. このような累積的な変化が普遍的に生じていることが確認されれば, 活断層の認定に応用できる可能性がある. 筆者らは, この考えに基づき, 断層の化学組成に着目して研究を進めている.

断層の化学組成から活断層の特徴を示そうとした先行研究はいくつか知られているが^{3), 5)}など, 個々の元素では大まかな傾向を認めることはできても, 指標として使用できるほどの明瞭な関係性は認められていない. 断層活動, およびその後の休止期間における元素移動については未知の部分が多く, 岩盤中に多数存在する元素が, それぞれ異なるプロセスで移動している可能性がある. この問題を解決するには, まず活断層と非活断層の化学的性質が総合的に異なるかどうかを仮説抜きに確認する必要がある. このような場合, データ駆動型解析のアプローチが有効と考えられる. Kuwatani et al.⁶⁾は, 2011年東北地方太平洋沖地震時の津波堆積物と, 非津波海成堆積物の化学組成(18元素)を説明変数として, 多変量解析手法の一つであるサポートベクターマシンを用いて両者が高確率で分けられることを示すとともに, 18元素から最も判別率の良い元素の組合せを探索した. 津波堆積物と非津波海成堆積物は, 供給源がどちらも海であり, 運搬過程も類似することから, 物理学的・化学的・生物学的性質のいずれから単独での識別は

* 富山大学 University of Toyama (会員)

E-mail: ryo@sus.u-toyama.ac.jp

** 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency (会員)

*** 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency

**** 日本原子力研究開発機構 (現所属: 中央開発株式会社)
 Japan Atomic Energy Agency (present affiliation: Chuo Kaihatsu Corporation) (会員)

難しいとされてきたが⁷⁾、データ駆動型解析により、化学的性質が異なる可能性が示された。

本研究では、断層の化学的性質が、活断層の認定方法として利用しうるかどうかなを確認することを目的として、Kuwatani et al.⁶⁾と同様のアプローチで活断層と非活断層の判別を試みた。具体的には、活断層か非活断層かが既知である断層の、最新活動の影響を最も強く受けていると考えられる未固結の細粒断層岩(断層ガウジ)の化学組成データを収集し、これを用いて線形判別分析を行った。さらに、その結果に基づき、活断層と非活断層の化学的性質の違いの程度と、両者の違いを表す元素について検討した。

2. 手 法

本研究は、文献収集、データ整理、変数選択、線形判別分析という流れで行った。このうち、変数選択と線形判別分析は、オープンソースの統計解析プログラミング言語であるR言語とその計算ライブラリを使用して行った。以下に各工程の内容を記す。

2.1 文献収集

日本列島に分布する断層を対象に断層ガウジの化学分析を行った論文・文献を収集し、化学組成データを抽出した。抽出にあたっては、原子力規制委員会^{8),9)}の定義に従い、後期更新世以降の活動が認められる断層を活断層、それ以外の断層を非活断層として、それらが認定できるものを選定した。すなわち、論文中に試料採取地点が詳細に示されており、活断層ないし非活断層からの採取であることが明確に分かるデータのみを採用した。なお、海外の断層を対象から外した理由は、テクトニクスなどの条件が日本とは異なっており、日本における活断層の概念または定義や基準がそのまま適用できないと考えられるためである。

2.2 入力データの整理

文献収集により得られたデータを統合し、活断層か非活断層の2つの分類を与えたデータテーブルを作成した。次いで、このデータテーブルから変数選択の検討に使用するデータを選択した。データ選択にあたっては、活断層データの母岩の種類と断層タイプを統一した。これらはいずれも断層ガウジの化学組成に強く影響を与える可能性があり、異なる種類のものを混在させると誤った結論に至るおそれがある。これに続き、解析対象とする元素を選択した。変数選択および線形判別分析では、全試料が共通の項目を持つ必要があるが、文献収集で得られた化学組成データは、必ずしも同じ元素を測定している訳ではないため、こうした元素の選択が必要になる。選択にあたっては、元素の種類と試料数をできるだけ多くとれるよう考慮した。

収集した化学組成データは、主要元素を各酸化物の重量％、微量元素をppmの数値に揃え、鉄については湿式分析を不要とすべく、全鉄を Fe_2O_3 換算し、 Fe_2O_3^* と表記する

こととした。具体的には、文献に Fe_2O_3 、 FeO それぞれの重量％が掲載されている場合、 FeO の値を1.1114倍¹⁰⁾して Fe_2O_3 の値と足し合わせる岩石学の一般的取り扱いに則った。

組成データは、変数の総和が定数で固定されているため(定数和制約と呼ばれる)、変数(この場合は各元素)の独立性が保たれず、実数データのように統計処理を行うことはできない^{11),12)}。そこで、対数比解析^{11),12)}を用いて組成データを実数に変換した。対数比解析は、組成データにある共通の変数で規格化し、変数の相対的な変動のみを表すものである。対数比解析には相対対数比変換と有心対数比変換があるが^{11),12)}、相対対数比変換は元の変数のうち一つを規格化の単位として用いるため、規格化の単位として用いた変数について統計的な検討をすることができない。そのため、本研究では、全ての変数について統計的な検討をすることができる有心対数比変換を採用した。有心対数比変換は、変数をその幾何平均で除し、その自然対数をとることにより規格化する変換法である。

2.3 変数選択

線形判別分析では、一般に、入力データの説明変数の数(=次元)が増えると個別のデータの差異が小さくなり、判別ができなくなる“次元の呪い”や、説明変数が増えた結果、分類が細分化して入力データに特化した判別結果が出る“過剰適合”と呼ばれる現象が起りやすくなる¹³⁾。これらはいずれも、線形判別分析の結果として得られる判別式の判別能力を低下させる原因となりうる。これらの問題を回避するためには、予め判別に適した元素を選択する必要がある¹³⁾。

そこで本研究では、赤池情報量基準(AIC)¹⁴⁾を使って変数選択を行った。AICは、複数の統計的モデルの良さを比較・評価するための規準であり、 $\text{AIC} = -2 \times (\text{モデルの最大対数尤度}) + 2 \times (\text{モデルの自由パラメータ数})$ の値が小さいほど予測精度が高いモデルであるとしたものである¹⁵⁾。本研究では、2.2で選択したデータの分類と化学組成を入力データとして、元素の組み合わせを変えて一般化線形モデルでAICを逐次計算し、最も低い値になる組み合わせを探索した。R言語の計算ライブラリはMASSを、実行コマンドはstepAICを使用した。stepAICでは統計的仮説検定に用いられるp値と、それに基づく重みが出力されるため、これも変数選択の参考にした。本研究の場合、p値は活断層と非活断層の2群における各元素の平均値が有意に異なると言えるかどうかを検定する値となる。p値が小さいほど、その元素は2群の違いを有意に説明しうる、ということになる。通例、p値が0.05(5%)を下回ると帰無仮説(2群に差がないとする仮説)が棄却され、各変数における2群の分布が等しいことを否定する¹⁶⁾。

2.4 線形判別分析

線形判別分析は、2群が正規分布すること、等分散性を持つことを前提として、多次元における2群の中心点を基準として、2群が最大限分かれる直線に直交する直線の式(判別式)を求める手法である。この判別式は $y = \beta_1 \times x_1 + \beta_2 \times x_2 + \dots + \beta_n \times x_n - \alpha$ の形をとる。ここで、 y は判別得点であり、対象が2群の場合、 y の正負でどちらの群に属するかが決まる。 x は説明変数の数値であり、本研究の場合は変数選択で選択された元素の分析値に対し有心対数比変換を行った値である。 α は定数で、 β は各元素にかかる係数(判別係数)である。各元素の値を平均が0、分散が1となるように標準化して線形判別分析を実施した場合、 β の大きさがそのまま各元素の判別への寄与度とみなせる。線形判別分析に用いた元素の組み合わせは、AICで選択された全元素と、 p 値が0.05未満の元素、同じく0.01未満の元素の3ケースとした。R言語の計算ライブラリはMASSを、実行コマンドはldaおよびscaleを使用した。

説明変数同士に極端に高い相関がある場合、標準誤差が大きくなり、新たなデータが加わった時に推定値が大きく変化することがある(共線性、あるいは多重共線性と呼ぶ)¹⁶⁾。

これは、前述の次元の呪いや過剰適合と同じく、判別式の判別能力を低下させる原因となりうる。そこで、線形判別分析を行うと同時に各元素の分散拡大係数(VIF: Variance Inflation Factor)を算出し、共線性の有無を確認した。VIF = $1/(1-R^2)$ であり、この値が小さいほど共線性が低い。ここで、 R^2 はある説明変数を他の全ての説明変数で重回帰分析した時の決定係数である。VIFが10を超えると、その変数は共線性の要因になっていることが示唆される¹⁶⁾。こうした場合、共線性の高い変数のうち一つだけを残して処理を行う¹⁶⁾。R言語の計算ライブラリはcarを、実行コマンドはvifを使用した。

3. 結 果

3.1 文献収集

文献収集の結果、公表論文7編と原子力機構作成の報告書2編から、断層ガウジの化学組成データが活断層65試料、非活断層32試料の合計97試料が抽出された(表-1)。分析対象のうち、活断層のデータは、下葛木断層、境峠断層、阿寺断層、五助橋断層、六甲断層、野島断層など中部～近畿の山地に分布する横ずれ断層が卓越する(図-1)。逆断

表-1 文献収集結果

文献収集により抽出された断層ガウジ試料の出典・断層名・活断層/非活断層の数、母岩の種類を示す。

出典	No.	文献	対象断層		断層ガウジ試料		母岩
			活断層	非活断層	全データ	入力データ	
公表論文	1	Fujimoto et al. ¹⁷⁾	野島断層	—	3 (活断層3)	3 (活断層3)	花崗閃緑岩
	2	Matsuda et al. ¹⁸⁾	野島断層	—	6 (活断層6)	0	花崗閃緑岩
	3	Hashimoto et al. ¹⁹⁾	—	地質境界断層	1 (非活断層1)	0	頁岩、片岩
	4	長友・吉田 ²⁰⁾	阿寺断層	—	13 (活断層13)	0	流紋岩
	5	加藤ほか ²¹⁾	阿寺断層	—	7 (活断層7)	7 (活断層7)	花崗岩
	6	Niwa et al. ²²⁾	阿寺断層	—	2 (活断層2)	2 (活断層2)	花崗岩、溶結凝灰岩
報告書	7	Niwa et al. ⁵⁾	白木-丹生断層	小断層	14 (活断層5, 非活断層9)	3 (非活断層3)	花崗岩
	8	富山大学・日本原子力研究開発機構 ²³⁾	白木-丹生断層	小断層	13 (活断層3, 非活断層10)	10 (非活断層10)	花崗岩
	9	富山大学・日本原子力研究開発機構 ²⁴⁾	下葛木断層、境峠断層、白木-丹生断層、五助橋断層、六甲断層	小断層	38 (活断層26, 非活断層12)	33 (活断層24, 非活断層9)	花崗岩、流紋岩、溶結凝灰岩、堆積岩

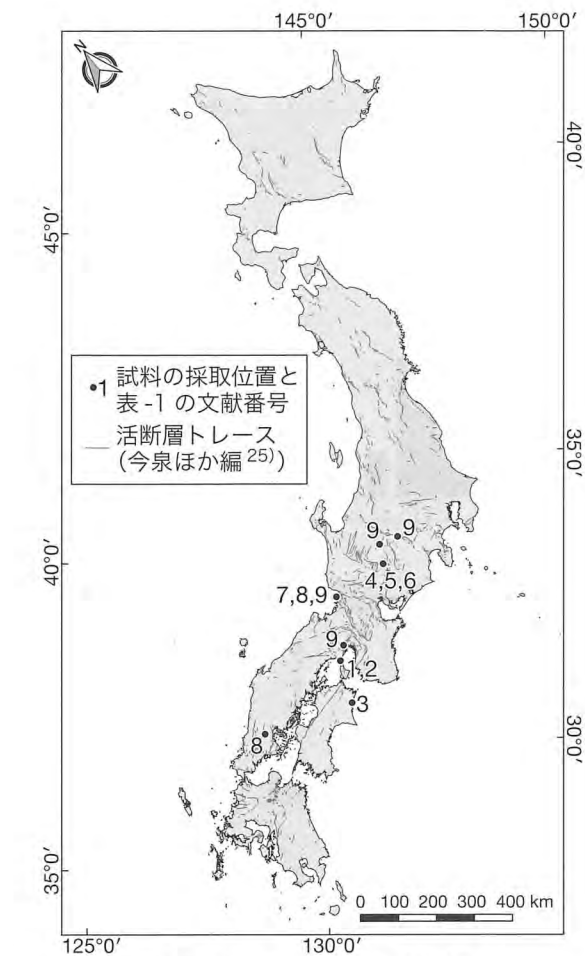


図-1 断層ガウジ試料の採取位置

文献収集および追加分析における断層ガウジ試料の大まかな採取位置を活断層トレースの分布とともに示す。採取位置には表-1の番号を付した。

層のデータは福井県の敦賀半島に分布する白木-丹生断層のみで、正断層のデータは含まれていない。また、活断層・非活断層ともに、抽出されたデータは花崗岩質岩類のものが多く、多くのデータは露頭で採取された試料を分析したものであるが、Fujimoto et al.¹⁷⁾、Matsuda et al.¹⁸⁾による野島断層のデータは深部ボーリングコア試料のものである。分析対象断層の分布や断層タイプに偏りがあるのは、断層ガウジを露頭で観察しやすい条件が揃っているためと考えられる。

3.2 入力データの整理

文献収集と追加分析を統合した総数97試料のデータテーブルから、変数選択を行う試料を決定した(表-2)。結果として、試料の数は活断層36試料、非活断層22試料の合計58試料となった。

前節で述べた通り、母岩の種類は花崗岩質岩類が、断層タイプは横ずれ断層が卓越する。このため、入力データは花崗岩質岩類を母岩とする横ずれ断層のものに限定した。除外されたのは、逆断層(後期白亜紀の江若花崗岩中に発達する白木-丹生断層^{5), 23), 24)}、および外帯(牟岐メランジュの黑色頁岩と上部白亜系日和佐層群の塊状砂岩の境界断層¹⁹⁾)の試料である。

説明変数の候補となる元素は主要10元素(SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃^{*}, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅)に加え、微量5元素(Rb, Sr, Y, Ba, Th)の計15元素とした。除外した試料は、これらの元素が測定されていないか、分析下限未満だったものである。

こうして決定した試料の分析値を重量%に揃えて有心対

表-2 解析データの一覧

解析に用いた試料の一覧を、活断層/非活断層のタイプおよび表-1の出典番号とともに示す。試料名は文献と対応する。

No.	試料名	種類	表-1の 文献番号	No.	試料名	種類	表-1の 文献番号	No.	試料名	種類	表-1の 文献番号	No.	試料名	種類	表-1の 文献番号
1	98-10	活断層	1	16	ARM1	活断層	9	31	STK-C07	活断層	9	46	Hr10A_1	非活断層	8
2	99-1	活断層	1	17	ARM4	活断層	9	32	STK-C08	活断層	9	47	Hr10A_2	非活断層	8
3	114-1	活断層	1	18	GSB-C02	活断層	9	33	STK-C09	活断層	9	48	Ko9-4-2_2	非活断層	8
4	FG01-1	活断層	5	19	GSB-C03	活断層	9	34	FSW-C08	活断層	9	49	Ko9-4-2_3	非活断層	8
5	FG01-2	活断層	5	20	GSB-C06	活断層	9	35	FSW-C09	活断層	9	50	MP-07-1	非活断層	9
6	FG03-1	活断層	5	21	GSB-C07	活断層	9	36	FSW-C10	活断層	9	51	MP-07-2	非活断層	9
7	FG05-1	活断層	5	22	GSB-C08	活断層	9	37	m003-1	非活断層	7	52	MP-07-3	非活断層	9
8	FG06-1	活断層	5	23	GSB-C09	活断層	9	38	m003-3	非活断層	7	53	Ko12-1-1	非活断層	9
9	FG02-A	活断層	5	24	GSB-C10	活断層	9	39	m003-4	非活断層	7	54	HRK-C05	非活断層	9
10	FG02-B	活断層	5	25	GSB-C11	活断層	9	40	1602	非活断層	8	55	HRK-C09	非活断層	9
11	K-19	活断層	6	26	GSB-C12	活断層	9	41	1603	非活断層	8	56	HRK-C13	非活断層	9
12	K-20	活断層	6	27	GSB-C13	活断層	9	42	2301	非活断層	8	57	HRK-C14	非活断層	9
13	GSK1	活断層	9	28	GSB-C14	活断層	9	43	2504	非活断層	8	58	HRK-C15	非活断層	9
14	GSK2	活断層	9	29	STK-C02	活断層	9	44	2602	非活断層	8				
15	GSK3	活断層	9	30	STK-C03	活断層	9	45	2603	非活断層	8				

数比変換を行い、入力データとした。

3.3 変数選択

AICを使った変数選択の結果、15元素から TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3^* 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Rb 、 Y 、 Ba 、 Th の10元素が選択された。計算開始時の15元素でのAICは-49.900で、計算終了時の10元素でのAICは-57.141だった。選択された10元素のうち、p値が0.05未満の元素は TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Rb 、 Ba 、 Th の7元素で、同じく0.01未満の元素は TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Rb の5元素だった(表-3)。

3.4 線形判別分析

①AICで選択された10元素、②同じくp値0.05未満の7元素、③p値0.01未満の5元素の組み合わせで入力データを標準化して線形判別分析を行った。その結果、活断層と非活断層の判別率は①②③いずれも100%となった(図-2)。各ケースの判別得点の分布は、活断層と非活断層が明確に分かれており、かつ元素数が減るほど2群の分散が小さくなる(図-2)。各ケースの判別係数 β は上位5位が共通、すなわち③の組み合わせであり、p値と整合する(表-4)。また、各ケースのVIFは全ての元素で10を下回っており、明らかな共線性は認められないが、①から③へ元素の数が減るにつれて低下する(表-4)。

4. 考 察

4.1 活断層と非活断層の化学的性質の違いの有無について

①～③の線形判別分析の結果、判別率は全てのケースで100%となった。すなわち、本研究で用いたデータセットと解析方法によれば、国内の花崗岩中に発達する横ずれ活断層と非活断層の化学的性質は統計的に異なる、ということになる。本研究で解析対象としたデータの数に限られており、これをもって確定的な結論を出すことは難しいが、

表-3 変数選択 (AIC) の結果

AICによる変数選択の結果を示す。Pは検定統計量tを変換したp値である。

	回帰係数 (推定値)	標準誤差	検定統計量 t	P(> t)	Pに基づく 重み
(Intercept)	3.79E-01	1.75E-02	21.63	<2.00E-16	***
TiO_2	-3.16E-01	5.56E-02	-5.67	8.45E-07	***
Al_2O_3	-5.71E-01	1.27E-01	-4.50	4.46E-05	***
Fe_2O_3^*	-5.99E-02	4.08E-02	-1.47	1.49E-01	
MnO	3.20E-02	2.03E-02	1.58	1.21E-01	
MgO	2.40E-01	5.26E-02	4.57	3.57E-05	***
CaO	-1.19E-01	2.01E-02	-5.90	3.77E-07	***
Rb	4.59E-01	7.91E-02	5.80	5.40E-07	***
Y	-9.72E-02	5.59E-02	-1.74	8.85E-02	
Ba	-1.35E-01	5.10E-02	-2.64	1.11E-02	*
Th	-1.79E-01	8.05E-02	-2.23	3.09E-02	*

重み: $P=0 \leq \text{***} < 0.001 \leq \text{**} < 0.01 \leq \text{*} < 0.05 \leq \text{.} < 0.1 \leq \text{ } < 1$

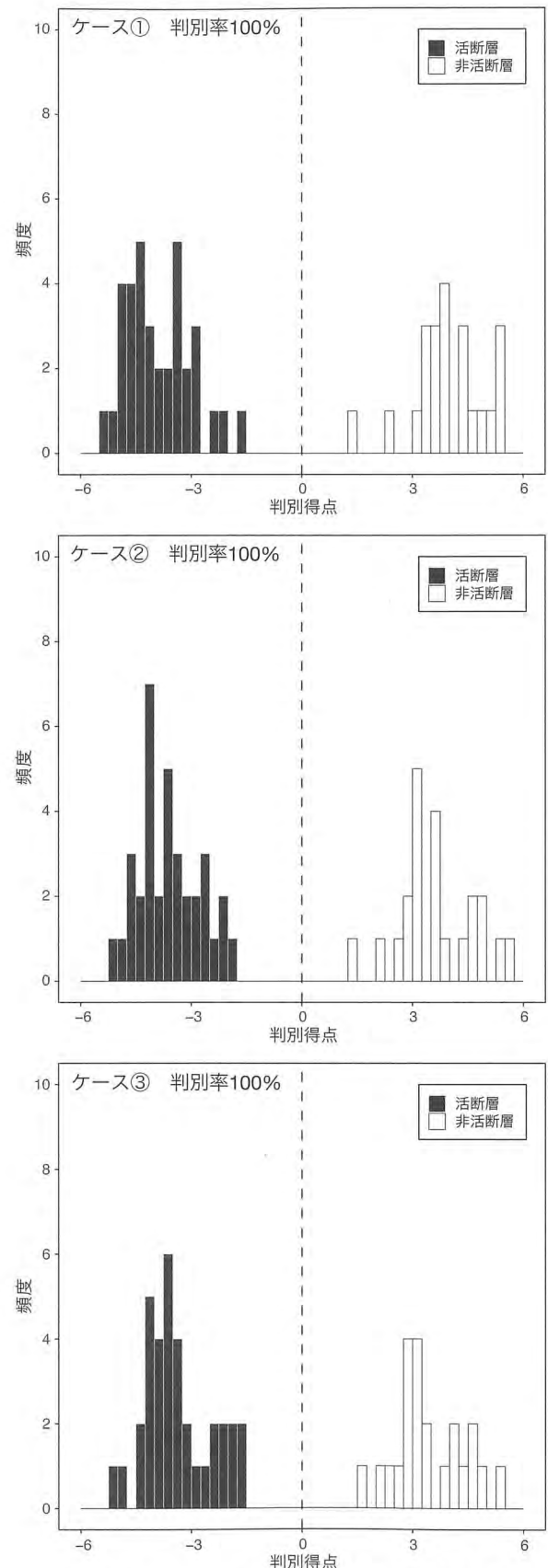


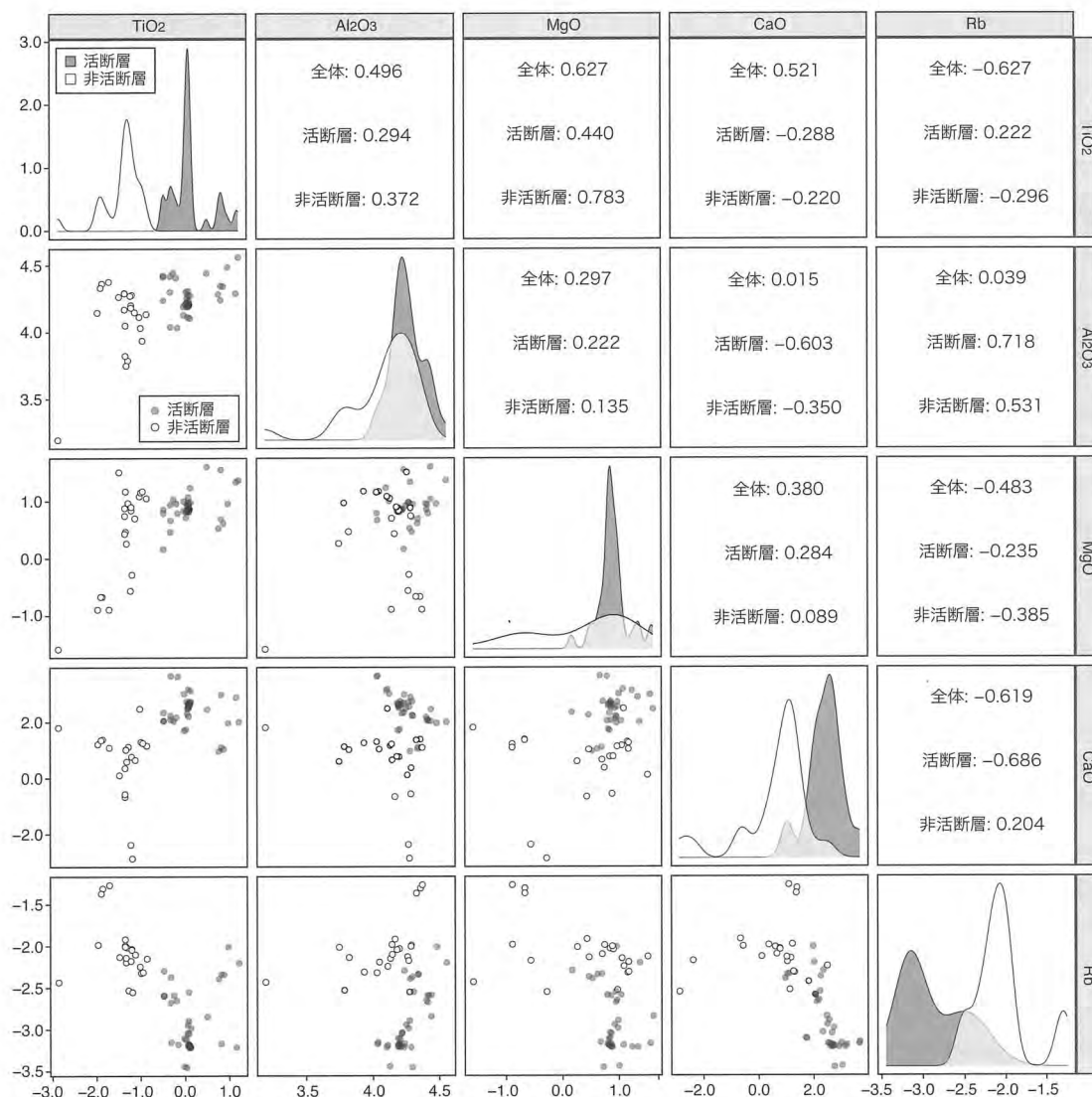
図-2 ケース①～ケース③の線形判別分析結果

ケース①～ケース③における判別得点の分布を活断層／非活断層のタイプごとに示す。判別得点が正ならば非活断層、負ならば活断層と判別されたことになり、タイプと判別領域に齟齬がある場合、誤判別とみなす。

表-4 ケース①～ケース③の判別関数

ケース①～ケース③における各元素の判別関数 β を降順でVIFとともに示す。 β の絶対値が判別得点に寄与する度合いを示すため、その降順で各元素を並べた。

ケース①	β	β (絶対値)	VIF	ケース②	β	β (絶対値)	VIF	ケース③	β	β (絶対値)	VIF
TiO ₂	-2.35	2.35	7.70	TiO ₂	-2.16	2.16	4.57	TiO ₂	-1.94	1.94	3.54
Rb	2.12	2.12	5.98	Rb	1.55	1.55	3.93	Rb	1.33	1.33	2.58
MgO	1.28	1.28	3.53	MgO	1.22	1.22	2.07	CaO	-1.09	1.09	1.73
CaO	-1.27	1.27	2.08	CaO	-1.18	1.18	1.81	MgO	0.98	0.98	1.69
Al ₂ O ₃	-1.00	1.00	2.21	Al ₂ O ₃	-0.80	0.80	1.94	Al ₂ O ₃	-0.85	0.85	1.85
Ba	-0.86	0.86	4.80	Th	-0.79	0.79	5.19				
Y	-0.81	0.81	9.74	Ba	-0.65	0.65	4.60				
Th	-0.80	0.80	5.74								
Fe ₂ O ₃ *	-0.33	0.33	2.24								
MnO	0.32	0.32	1.87								



軸の単位は無次元である。

図-3 ケース③の5元素の分布と相関

ケース③の5元素の分布と相関をクロスプロットで示す。図の左上から右下に向かう対角線の右上が各元素間の相関係数で、上から入力データ全体、活断層、非活断層のものである。対角線上が各元素における活断層／非活断層の密度分布である。対角線を挟んで左下がタイプごとの散点図である。なお、この図のデータは対数比変換後の数値である。すなわち、軸の単位は無次元である。

今後データ数を拡充することで、判別の確度の向上が見込まれる。

またこの結果は、当初の仮説である、断層の最新活動後の時間的経過とともに生じる変化がある、ということを支持する。これがイベントによるものなのか、あるいは累積的なものなのかを明らかにするには、元素の移動メカニズムに関する議論を進める必要があるが、母岩の種類と断層タイプという基本的な条件のみが共通するデータセットでこのような結果が得られたことは、断層活動休止期間の累積的な変化が生じている可能性が高いことを示唆する。

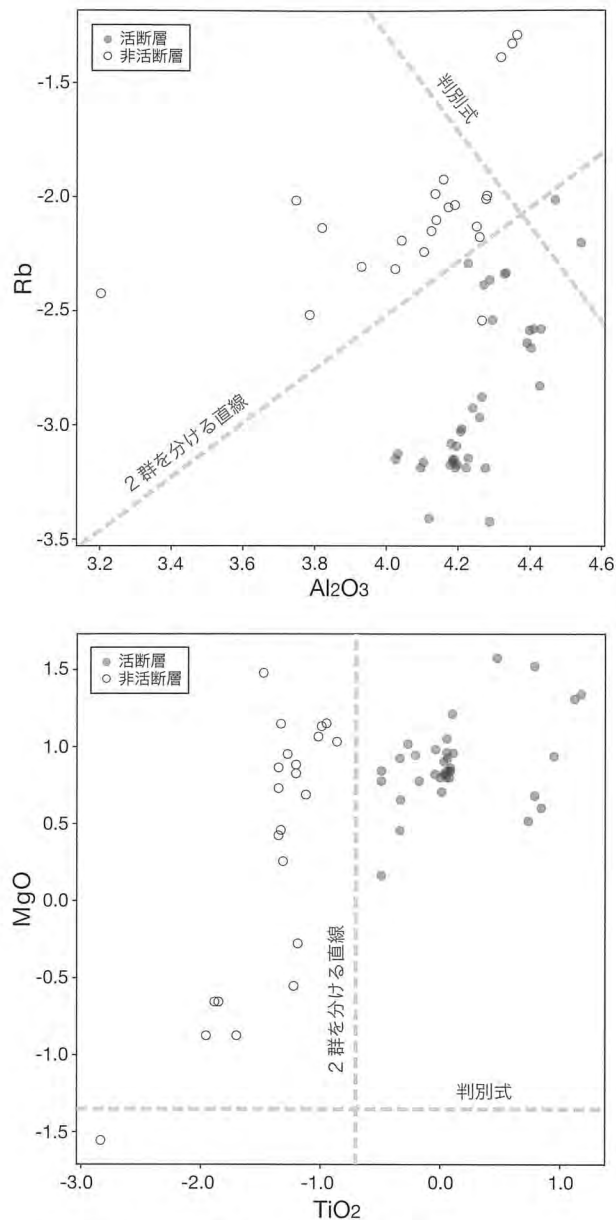
4.2 活断層と非活断層の違いを表す元素について

①～③の線形判別分析の結果、判別係数 β の上位5元素(TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Rb)は各ケースで共通しており、それらは p 値とも整合する。これら5元素の分布パターンは3つに分けられる。 TiO_2 と CaO は非活断層のデータが活断層に比べて低い値の側に分布するのに対して、 Rb はその逆である。また、 Al_2O_3 と MgO は非活断層のデータが幅広い分布を示すのに対して、活断層のデータが高い値の側に集中した分布を示す(図-3)。中でも、 TiO_2 は活断層と非活断層が全く重ならず、両者が完全に分かれている(図-3)。2つの元素の組み合わせによる相関係数は、 Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO の順に活断層と非活断層の2群と高い相関を示す(図-3)。これらの元素の組み合わせは線形判別分析における理想的な分布パターンを示す(図-4)。 Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO は、2群を最大限に分ける直線の判別率がそれぞれ98%、100%と非常に高く、さらに活断層と非活断層のデータがこの直線に平行に分布する。これは、この直線の自由度が低く、判別式の安定性が高い(判別の確度が高い)ことを示しており、 TiO_2 だけでなく、 Al_2O_3 、 Rb 、 MgO も活断層と非活断層の違いを表す元素として重要であることが分かる。

このように、統計解析による結果から絞り込まれた TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Rb の5元素は、分布パターンから見ても花崗岩質岩類中の横ずれ活断層と非活断層の違いを表しており、そこから更に絞り込まれた Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO の4元素は、それぞれの組み合わせも含め重要と考えられる。これらの元素の移動と断層活動との関連については更に検討する必要があるが、一般に流体中で移動しにくいとされる TiO_2 ²¹⁾や移動しやすいとされる Rb ²¹⁾が含まれていることを踏まえると、断層活動休止期間に溶脱と濃集の両方が生じている可能性が高いと考えられる。

5. お わ り に

本研究では、断層の化学的性質が活断層の認定に利用しうるかどうかを確認することを目的として、国内における花崗岩質岩類中の横ずれ活断層と、既に活動を終えている断層の断層ガウジの化学組成データを用いて線形判別分析



軸の単位は無次元である。

図-4 Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO の関係

入力データの Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO の関係を散布図で示す。活断層と非活断層のデータを2分する直線(図中の2群を分ける直線)と、これに直交する直線(図中の判別式)を概念的に示す。2群を分ける直線が判別得点=0の軸となる。なお、この図のデータは対数比変換後の数値である。すなわち、軸の単位は無次元である。

を行い、両者が分かれることを示した。また、両者の違いを表す元素を TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Rb の5つに絞り込むとともに、うち4つの元素のペア(Al_2O_3 と Rb 、 TiO_2 と MgO)の分布から、判別の確度が高いことを示した。これらの結果は、活断層と既に活動を終えている断層の化学的性質が異なることと、母岩の種類と断層タイプを揃えれば、確度の高い判別ができる可能性があることを示唆している。さらに、本研究の手法では、2群を判別する式が得られるため、岩盤中に分布する断層において普遍的に存

在する断層岩の化学分析により活断層か既に活動を終えている断層かを判別できる可能性がある。

ただし、本研究で解析対象とした試料数は多いとは言えず、かつ花崗岩質岩類中の横ずれ断層に限られているため、今後、縦ずれ断層を含めデータ数を拡充し、断層活動とその後の活動休止期間における元素移動メカニズムの議論を進めることで、活断層と既に活動を終えている断層の化学的性質の違いが検証されるとともに、活断層の認定方法として確立しうる可能性がある。本研究では断層の最新活動時期の違いに着目したが、断層の化学的性質は累積変位量、断層活動時の温度、流体の性状の要因にも影響されることが予想されるため、今後はこれらも踏まえて研究を進める予定である。

謝辞 富山大学学術研究部の濱田 篤准教授、安江健一准教授に感謝する。本研究は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）」の成果の一部である。

引用文献

- 1) McCaig, J. (2009) : Paleoseismology, 2nd Edition, Elsevier, 629p.
- 2) 石渡 明 (2016) : 鉱物脈法による断層活動性評価について, 日本地質学会第123年学術大会, R23-O-3.
- 3) 大谷具幸・沓名亮輔・小嶋 智・若居勝二・各務和彦・榎並正樹 (2011) : 根尾谷断層破砕帯における微量元素の濃集と最新すべり面との関係, 日本地質学会第118年学術大会・日本鉱物科学会2011年年会合同学術大会, R19-O-6.
- 4) 藤内智士・重松紀生・今西和俊・吾妻 崇・溝口一生・大谷具幸・沓名亮輔 (2011) : 地震学的に推定される応力と地質学的に推定される活断層の運動方向との比較: 阿寺断層系の例, 活断層・古地震研究報告, No. 11, pp. 139-150.
- 5) Niwa, M., Shimada, K., Ishimaru, T. and Tanaka, Y. (2019) : Identification of capable faults using fault rock geochemical signatures : A case study from offset granitic bedrock on the Tsuruga Peninsula, central Japan, *Engineering Geology*, Vol. 260, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105235>.
- 6) Kuwatani, T., Nagata, K., Okada, M., Watanabe, T., Ogawa, Y., Komai T. and Tsuchiya, N. (2014) : Machine-learning techniques for geochemical discrimination of 2011 Tohoku tsunami deposits, *Scientific Reports*, Vol. 4, Article number: 7077, <https://doi.org/10.1038/srep07077>.
- 7) 小松原純子 (2012) : 浅海域および沿岸低地に堆積した津波堆積物の識別基準, 堆積学研究, Vol. 71, No. 2, pp. 119-127.
- 8) 原子力規制委員会 (2013) : 実用発電用原子炉に係る新規規制基準について—概要—, <https://www.nsr.go.jp/data/000050063.pdf>, 平成25年7月 (2021年3月3日閲覧).
- 9) 原子力規制委員会 (2013) : 敷地内及び敷地周辺の地質・地質構造調査に係る審査ガイド, 平成25年6月6日時点での修正案, <https://www.nsr.go.jp/data/000069164.pdf> (2021年3月3日閲覧).
- 10) Stevens, R. E. and Niles, W. W. (1960) : Part 1. Chemical analyses of the granite and the diabase. In Stevens, R. E. et al., Second Report on a Cooperative Investigation of the Composition of Two Silicate Rocks, Geological Survey Bulletin, 1113, pp. 3-43.
- 11) Aitchison, J. (1986) : The statistical analysis of compositional data, Chapman and Hall, London, 416p.
- 12) 太田 亨・新井宏嘉 (2006) : 組成データ解析の問題点とその解決方法, 地質学雑誌, Vol. 112, No. 3, pp. 173-187.
- 13) 石井健一郎・上田修功・前田英作・村瀬 洋 (2019) : わかりやすいパターン認識 第2版, オーム社, 257p.
- 14) Akaike, H. (1973) : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, Petrov, B. N., and Caski, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest: pp. 267-281.
- 15) 二宮正士 (1999) : AIC (赤池情報量規準: Akaike Information Criterion), 日本食品科学工学会誌, Vol. 46, No. 1, pp. 37-38.
- 16) 川端一光・岩間徳兼・鈴木雅之 (2018) : Rによる多変量解析, オーム社, 417p.
- 17) Fujimoto, K., Tanaka, H., Higuchi, T., Tomida, N., Ohtani, T. and Ito, H. (2001) : Alteration and mass transfer inferred from the Hirabayashi GSJ drill penetrating the Nojima Fault, Japan, *The Island Arc*, Vol. 10, Issue 3-4, pp. 401-410.
- 18) Matsuda, T., Arai, T., Ikeda, R., Omura, K., Kobayashi, K., Sano, H., Sawaguchi, T., Tanaka, H., Tomita, T., Tomida, N., Hirano, S. and Yamazaki, A. (2001) : Examination of mineral assemblage and chemical composition in the fracture zone of the Nojima Fault at a depth of 1140 m : Analyses of the Hirabayashi NIED drill cores, *The Island Arc*, Vol. 10, Issue 3-4, pp. 422-429.
- 19) Hashimoto, Y., Nikaizo, A. and Kimura, G. (2009) : A geochemical estimation of fluid flux and permeability for a fault zone in Mugé mélange, the Cretaceous Shimanto Belt, SW Japan, *Journal of Structural Geology*, Vol. 31, Issue 2, pp. 208-214.
- 20) 長友晃夫・吉田英一 (2009) : 断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析, 地質学雑誌, Vol. 115, No. 10, pp. 512-527.
- 21) 加藤尚希・廣野哲朗・石川剛志・大谷具幸 (2015) : 阿寺断層田瀬露頭における断層ガウジの鉱物学的・地球化学的特徴, 活断層研究, No. 43, pp. 1-16.
- 22) Niwa, M., Mizuochi, Y. and Tanase, A. (2015) : Changes in chemical composition caused by water-rock interactions across a strike-slip fault zone : case study of the Atera Fault, Central Japan, *Geofluids*, Vol. 15, Issue 3, pp. 387-409.
- 23) 富山大学・日本原子力研究開発機構 (2019) : 機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究, 平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発【付録集】, pp. 45-80, https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2018/30fy_choukiantaisei_huroku.pdf (2021年3月3日閲覧).
- 24) 富山大学・日本原子力研究開発機構 (2020) : 機械学習に基づいた断層の活動性評価手法の開発に関する共同研究, 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発

事業 地質環境長期安定性評価技術高度化開発【付録集】，
pp. 付5-1 - pp. 付5-67, [https://www.enecho.meti.go.jp/
category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/
2019/3lfy_choukianteisei_huroku.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2019/3lfy_choukianteisei_huroku.pdf) (2021年3月3日閲覧).

25) 今泉俊文・宮内崇裕・堤 浩之・中田 高 編 (2018): 活
断層詳細デジタルマップ「新編」, 東京大学出版会, 154p.

(2020年6月1日受付, 2021年4月14日受理)

Jour. Japan Soc. Eng. Geol., Vol. 62, No. 2 pp. 104-112, 2021

Discrimination Between Active and Non-Active Faults Based on the Chemical Composition of Fault Gouge— An Attempt Using Linear Discriminant Analysis

Ryo TATEISHI, Koji SHIMADA, Mayuko SHIMIZU, Tadamasa UEKI, Masakazu NIWA,
Shigeru SUEOKA and Tsuneari ISHIMARU

Key words : Fault gouge, Active fault, Chemical composition, Linear discriminant analysis

訂正

編集委員会

本誌に掲載された下記の原稿に訂正事項がありますので、お知らせいたします。

掲載箇所：応用地質，第62巻，第2号，104-112ページ，2021

原稿の種別：資料

表題：断層ガウジの化学組成に基づく活断層と非活断層の判別—線形判別分析による試み

著者：立石 良，島田耕史，清水麻由子，植木忠正，丹羽正和，末岡 茂，石丸恒存

訂正箇所：108ページ

誤	正
3.3 変数選択 AICを使った変数選択の結果，15元素からTiO ₂ ，Al ₂ O ₃ ，Fe ₂ O ₃ [*] ，MnO，MgO，CaO，Rb，Y，Ba，Thの10元素が選択された．計算開始時の15元素でのAICは-49.900で，計算終了時の10元素でのAICは-57.141だった．選択された10元素のうち，p値が0.05未満の元素はTiO ₂ ，Al ₂ O ₃ ，MgO，CaO，Rb，Ba，Thの7元素で，同じく0.01未満の元素はTiO ₂ ，Al ₂ O ₃ ，MgO，CaO，Rbの5元素だった(表-3)．	3.3 変数選択 AICを使った変数選択の結果，15元素からTiO ₂ ，Al ₂ O ₃ ，Fe ₂ O ₃ [*] ，MnO，MgO，CaO，Na ₂ O，K ₂ O，P ₂ O ₅ ，Sr，Y，Ba，Thの13元素が選択された．計算開始時の15元素でのAICは-45.80で，計算終了時の13元素でのAICは-47.74だった．選択された13元素は全てp値が0.01未満であり，MgOとK ₂ Oを除く11元素はp値が0.001未満となった(表-3)．このうちTiO ₂ ，MnO，CaO，Na ₂ O，Sr，Y，Baの7元素はp値が0.0001未満であった(表-3)．

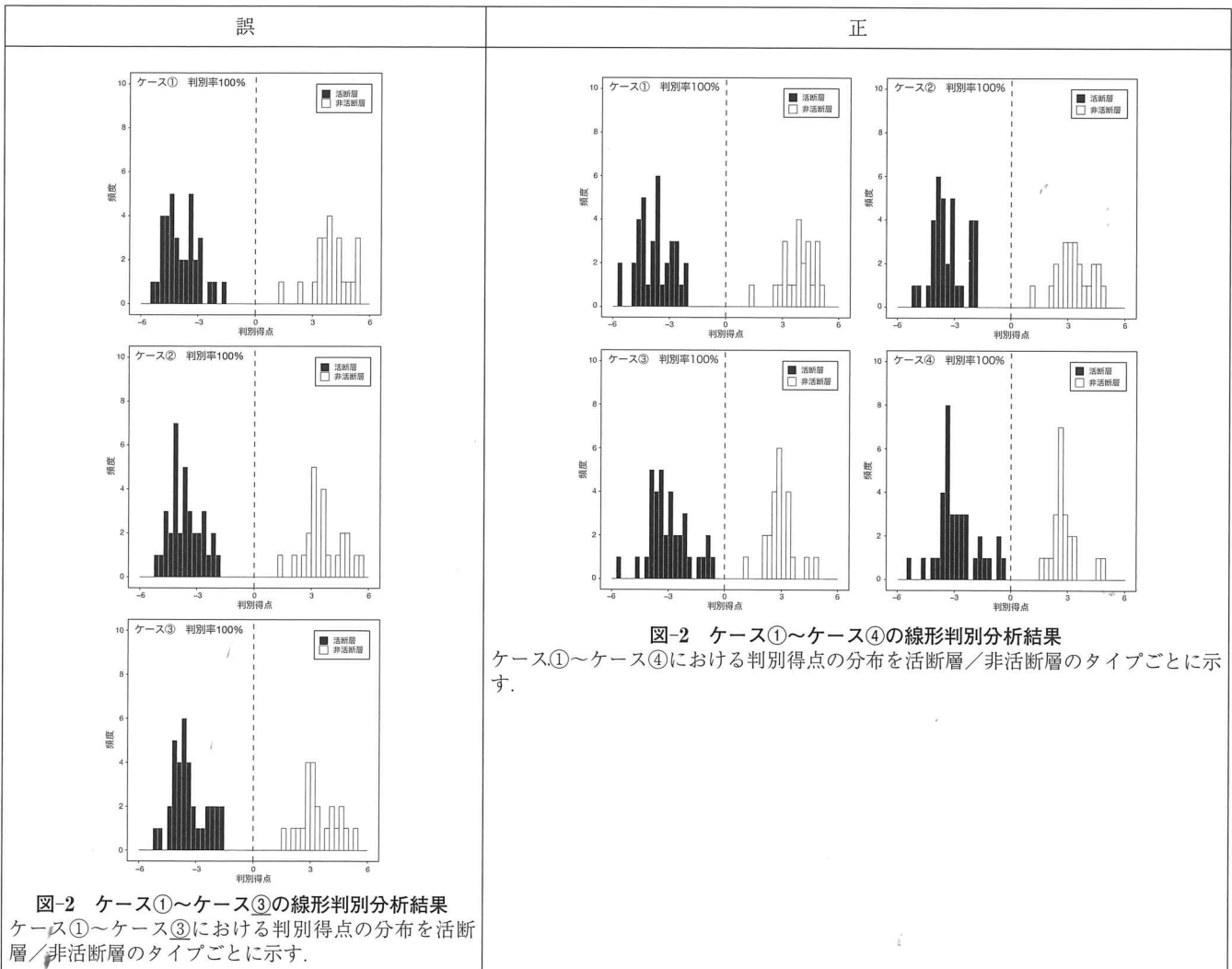
訂正箇所：108ページ

誤	正																																																																																																																																																																		
表-3 変数選択(AIC)の結果 AICによる変数選択の結果を示す. <table><tr><th></th><th>回帰係数 (推定値)</th><th>標準誤差</th><th>検定統計量 t</th><th>P(> t)</th><th>Pに基づく 重み</th></tr><tr><td>(Intercept)</td><td>3.79E-01</td><td>1.75E-02</td><td>21.63</td><td><2.00E-16</td><td>***</td></tr><tr><td>TiO₂</td><td>-3.16E-01</td><td>5.56E-02</td><td>-5.67</td><td>8.45E-07</td><td>***</td></tr><tr><td>Al₂O₃</td><td>-5.71E-01</td><td>1.27E-01</td><td>-4.50</td><td>4.46E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>Fe₂O₃[*]</td><td>-5.99E-02</td><td>4.08E-02</td><td>-1.47</td><td>1.49E-01</td><td></td></tr><tr><td>MnO</td><td>3.20E-02</td><td>2.03E-02</td><td>1.58</td><td>1.21E-01</td><td></td></tr><tr><td>MgO</td><td>2.40E-01</td><td>5.26E-02</td><td>4.57</td><td>3.57E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>CaO</td><td>-1.19E-01</td><td>2.01E-02</td><td>-5.90</td><td>3.77E-07</td><td>***</td></tr><tr><td>Rb</td><td>4.59E-01</td><td>7.91E-02</td><td>5.80</td><td>5.40E-07</td><td>***</td></tr><tr><td>Y</td><td>-9.72E-02</td><td>5.59E-02</td><td>-1.74</td><td>8.85E-02</td><td></td></tr><tr><td>Ba</td><td>-1.35E-01</td><td>5.10E-02</td><td>-2.64</td><td>1.11E-02</td><td>*</td></tr><tr><td>Th</td><td>-1.79E-01</td><td>8.05E-02</td><td>-2.23</td><td>3.09E-02</td><td>*</td></tr></table> 重みP：0≦****<0.001≦***<0.01≦**<0.05≦，"<0.1≦"<1		回帰係数 (推定値)	標準誤差	検定統計量 t	P(> t)	Pに基づく 重み	(Intercept)	3.79E-01	1.75E-02	21.63	<2.00E-16	***	TiO ₂	-3.16E-01	5.56E-02	-5.67	8.45E-07	***	Al ₂ O ₃	-5.71E-01	1.27E-01	-4.50	4.46E-05	***	Fe ₂ O ₃ [*]	-5.99E-02	4.08E-02	-1.47	1.49E-01		MnO	3.20E-02	2.03E-02	1.58	1.21E-01		MgO	2.40E-01	5.26E-02	4.57	3.57E-05	***	CaO	-1.19E-01	2.01E-02	-5.90	3.77E-07	***	Rb	4.59E-01	7.91E-02	5.80	5.40E-07	***	Y	-9.72E-02	5.59E-02	-1.74	8.85E-02		Ba	-1.35E-01	5.10E-02	-2.64	1.11E-02	*	Th	-1.79E-01	8.05E-02	-2.23	3.09E-02	*	表-3 変数選択(AIC)の結果 AICによる変数選択の結果をPの降順で示す. <table><tr><th></th><th>回帰係数 (推定値)</th><th>標準誤差</th><th>検定統計量 t</th><th>P(> t)</th><th>Pに基づく 重み</th></tr><tr><td>TiO₂</td><td>-1.05E+00</td><td>1.43E-01</td><td>-7.35</td><td>3.52E-09</td><td>***</td></tr><tr><td>Na₂O</td><td>-5.67E-01</td><td>8.75E-02</td><td>-6.48</td><td>6.74E-08</td><td>***</td></tr><tr><td>CaO</td><td>-8.00E-01</td><td>1.59E-01</td><td>-5.05</td><td>8.29E-06</td><td>***</td></tr><tr><td>Y</td><td>-8.11E-01</td><td>1.68E-01</td><td>-4.83</td><td>1.68E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>MnO</td><td>-6.74E-01</td><td>1.47E-01</td><td>-4.60</td><td>3.56E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>Sr</td><td>-8.80E-01</td><td>1.98E-01</td><td>-4.43</td><td>6.10E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>Ba</td><td>-6.56E-01</td><td>1.51E-01</td><td>-4.34</td><td>8.32E-05</td><td>***</td></tr><tr><td>P₂O₅</td><td>-7.06E-01</td><td>1.67E-01</td><td>-4.23</td><td>1.16E-04</td><td>***</td></tr><tr><td>Fe₂O₃[*]</td><td>-6.75E-01</td><td>1.60E-01</td><td>-4.23</td><td>1.17E-04</td><td>***</td></tr><tr><td>Th</td><td>-8.51E-01</td><td>2.02E-01</td><td>-4.22</td><td>1.21E-04</td><td>***</td></tr><tr><td>Al₂O₃</td><td>-1.27E+00</td><td>3.17E-01</td><td>-4.02</td><td>2.28E-04</td><td>***</td></tr><tr><td>MgO</td><td>-4.10E-01</td><td>1.24E-01</td><td>-3.30</td><td>1.92E-03</td><td>**</td></tr><tr><td>K₂O</td><td>-1.19E+00</td><td>3.79E-01</td><td>-3.13</td><td>3.14E-03</td><td>**</td></tr><tr><td>(Intercept)</td><td>-3.02E-01</td><td>1.27E+00</td><td>-0.24</td><td>8.13E-01</td><td></td></tr></table> 重みP：0≦****<0.001≦***<0.01≦**<0.05≦，"<0.1≦"<1		回帰係数 (推定値)	標準誤差	検定統計量 t	P(> t)	Pに基づく 重み	TiO ₂	-1.05E+00	1.43E-01	-7.35	3.52E-09	***	Na ₂ O	-5.67E-01	8.75E-02	-6.48	6.74E-08	***	CaO	-8.00E-01	1.59E-01	-5.05	8.29E-06	***	Y	-8.11E-01	1.68E-01	-4.83	1.68E-05	***	MnO	-6.74E-01	1.47E-01	-4.60	3.56E-05	***	Sr	-8.80E-01	1.98E-01	-4.43	6.10E-05	***	Ba	-6.56E-01	1.51E-01	-4.34	8.32E-05	***	P ₂ O ₅	-7.06E-01	1.67E-01	-4.23	1.16E-04	***	Fe ₂ O ₃ [*]	-6.75E-01	1.60E-01	-4.23	1.17E-04	***	Th	-8.51E-01	2.02E-01	-4.22	1.21E-04	***	Al ₂ O ₃	-1.27E+00	3.17E-01	-4.02	2.28E-04	***	MgO	-4.10E-01	1.24E-01	-3.30	1.92E-03	**	K ₂ O	-1.19E+00	3.79E-01	-3.13	3.14E-03	**	(Intercept)	-3.02E-01	1.27E+00	-0.24	8.13E-01	
	回帰係数 (推定値)	標準誤差	検定統計量 t	P(> t)	Pに基づく 重み																																																																																																																																																														
(Intercept)	3.79E-01	1.75E-02	21.63	<2.00E-16	***																																																																																																																																																														
TiO ₂	-3.16E-01	5.56E-02	-5.67	8.45E-07	***																																																																																																																																																														
Al ₂ O ₃	-5.71E-01	1.27E-01	-4.50	4.46E-05	***																																																																																																																																																														
Fe ₂ O ₃ [*]	-5.99E-02	4.08E-02	-1.47	1.49E-01																																																																																																																																																															
MnO	3.20E-02	2.03E-02	1.58	1.21E-01																																																																																																																																																															
MgO	2.40E-01	5.26E-02	4.57	3.57E-05	***																																																																																																																																																														
CaO	-1.19E-01	2.01E-02	-5.90	3.77E-07	***																																																																																																																																																														
Rb	4.59E-01	7.91E-02	5.80	5.40E-07	***																																																																																																																																																														
Y	-9.72E-02	5.59E-02	-1.74	8.85E-02																																																																																																																																																															
Ba	-1.35E-01	5.10E-02	-2.64	1.11E-02	*																																																																																																																																																														
Th	-1.79E-01	8.05E-02	-2.23	3.09E-02	*																																																																																																																																																														
	回帰係数 (推定値)	標準誤差	検定統計量 t	P(> t)	Pに基づく 重み																																																																																																																																																														
TiO ₂	-1.05E+00	1.43E-01	-7.35	3.52E-09	***																																																																																																																																																														
Na ₂ O	-5.67E-01	8.75E-02	-6.48	6.74E-08	***																																																																																																																																																														
CaO	-8.00E-01	1.59E-01	-5.05	8.29E-06	***																																																																																																																																																														
Y	-8.11E-01	1.68E-01	-4.83	1.68E-05	***																																																																																																																																																														
MnO	-6.74E-01	1.47E-01	-4.60	3.56E-05	***																																																																																																																																																														
Sr	-8.80E-01	1.98E-01	-4.43	6.10E-05	***																																																																																																																																																														
Ba	-6.56E-01	1.51E-01	-4.34	8.32E-05	***																																																																																																																																																														
P ₂ O ₅	-7.06E-01	1.67E-01	-4.23	1.16E-04	***																																																																																																																																																														
Fe ₂ O ₃ [*]	-6.75E-01	1.60E-01	-4.23	1.17E-04	***																																																																																																																																																														
Th	-8.51E-01	2.02E-01	-4.22	1.21E-04	***																																																																																																																																																														
Al ₂ O ₃	-1.27E+00	3.17E-01	-4.02	2.28E-04	***																																																																																																																																																														
MgO	-4.10E-01	1.24E-01	-3.30	1.92E-03	**																																																																																																																																																														
K ₂ O	-1.19E+00	3.79E-01	-3.13	3.14E-03	**																																																																																																																																																														
(Intercept)	-3.02E-01	1.27E+00	-0.24	8.13E-01																																																																																																																																																															

訂正箇所：108ページ

誤	正
3.4 線形判別分析 ①AICで選択された10元素, ②同じくp値0.05未満の7元素, ③p値0.01未満の5元素の組み合わせで入力データを標準化して線形判別分析を行った。その結果, 活断層と非活断層の判別率は①②③いずれも100%となった(図-2)。各ケースの判別得点の分布は, 活断層と非活断層が明確に分かれており, かつ元素数が減るほど2群の分散が小さくなる(図-2)。各ケースの判別係数βは上位5位が共通, すなわち③の組み合わせであり, p値と整合する(表-4)。また, 各ケースのVIFは全ての元素で10を下回っており, 明らかな共線性は認められないが, ①から③へ元素の数が減るにつれて低下する(表-4)。	3.4 線形判別分析 ①AICで選択された13元素, ②同じくp値0.001未満の11元素, ③同じくp値0.0001未満の7元素の組み合わせで入力データを標準化して線形判別分析を行った。その結果, 活断層と非活断層の判別率は①②③いずれも100%となった(図-2)。ただし, VIFは①で全ての元素, ②で5つの元素, ③でYのみ10を上回っており, 特に①②では明らかな共線性が認められた(表-4)。このため, ③からYのみを除いた6元素を④として線形判別分析を行った。その結果, ④も判別率は100%となった(図-2)。各ケースの判別得点の分布は, 活断層と非活断層が明確に分かれた(図-2)。強い共線性のない③④の判別係数βの上位2位は, どちらもTiO₂とSrである(表-4)。

訂正箇所：108ページ



訂正箇所：109ページ

誤	表-4 ケース①～ケース③の判別関数 ケース①～ケース③における各元素の判別関数 β を降順でVIFとともに示す。											
	ケース①				ケース②				ケース③			
		β	β (絶対値)	VIF		β	β (絶対値)	VIF		β	β (絶対値)	VIF
	TiO ₂	-2.35	2.35	7.70	TiO ₂	-2.16	2.16	4.57	TiO ₂	-1.94	1.94	3.54
	Rb	2.12	2.12	5.98	Rb	1.55	1.55	3.93	Rb	1.33	1.33	2.58
	MgO	1.28	1.28	3.53	MgO	1.22	1.22	2.07	CaO	-1.09	1.09	1.73
	CaO	-1.27	1.27	2.08	CaO	-1.18	1.18	1.81	MgO	0.98	0.98	1.69
	Al ₂ O ₃	-1.00	1.00	2.21	Al ₂ O ₃	-0.80	0.80	1.94	Al ₂ O ₃	-0.85	0.85	1.85
	Ba	-0.86	0.86	4.80	Th	-0.79	0.79	5.19				
	Y	-0.81	0.81	9.74	Ba	-0.65	0.65	4.60				
	Th	-0.80	0.80	5.74								
	Fe ₂ O ₃ *	-0.33	0.33	2.24								
	MnO	0.32	0.32	1.87								

正	表-4 ケース①～ケース④の判別関数 ケース①～ケース④における各元素の判別関数 β を降順でVIFとともに示す。											
	ケース①				ケース②				ケース③			
		β	β (絶対値)	VIF		β	β (絶対値)	VIF		β	β (絶対値)	VIF
	Y	-7.59	7.59	103.31	TiO ₂	-3.49	3.49	9.22	TiO ₂	-3.45	3.45	6.39
	CaO	-7.04	7.04	81.54	Y	-2.79	2.79	29.60	Sr	-1.49	1.49	5.54
	TiO ₂	-6.19	6.19	29.66	CaO	-2.56	2.56	14.93	Y	-1.18	1.18	19.02
	MnO	-5.97	5.97	70.43	Th	-1.87	1.87	27.50	Na ₂ O	-0.89	0.89	2.07
	Th	-5.03	5.03	59.40	Na ₂ O	-1.78	1.78	4.41	CaO	-0.74	0.74	2.77
	Sr	-4.92	4.92	51.48	MnO	-1.65	1.65	7.69	MnO	-0.68	0.68	1.41
	K ₂ O	-4.14	4.14	73.58	Ba	-1.41	1.41	13.32	Ba	0.17	0.17	3.40
	P ₂ O ₅	-4.13	4.13	39.89	Sr	-1.41	1.41	10.19				
	Fe ₂ O ₃ *	-3.41	3.41	27.24	P ₂ O ₅	-1.08	1.08	7.43				
	Na ₂ O	-3.32	3.32	11.03	Al ₂ O ₃	-0.94	0.94	9.03				
	Ba	-3.31	3.31	24.45	Fe ₂ O ₃ *	-0.77	0.77	2.90				
	Al ₂ O ₃	-2.85	2.85	21.18								
	MgO	-2.00	2.00	15.45								

訂正箇所：108ページ

誤	正
4.1 活断層と非活断層の化学的性質の違いの有無について ①～③の線形判別分析の結果、判別率は全てのケースで100%となった。	4.1 活断層と非活断層の化学的性質の違いの有無について ①～④の線形判別分析の結果、判別率は全てのケースで100%となった。

訂正箇所：110ページ

誤	正
4.2 活断層と非活断層の違いを表す元素について ①～③の線形判別分析の結果、判別係数 β の上位5元素(TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , MgO, CaO, Rb)は各ケースで共通しており、それらはp値とも整合する。これら5元素の分布パターンは3つに分けられる。TiO ₂ とCaOは非活断層のデータが活断層に比べて低い値の側に分布するのに対して、Rbはその逆である。また、Al ₂ O ₃ とMgOは非活断層のデータが幅広い分布を示すのに対して、活断層のデータが高い値の側に集中した分布を示す(図-3)。中でも、TiO ₂ は活断層と非活断層が全く重ならず、両者が完全に分かれている(図-3)。2つの元素の組み合わせによる相関係数は、Al ₂ O ₃ とRb、TiO ₂ とMgOの順に活断層と非活断層の2群と高い相関を示す(図-3)。これらの元素の組み合わせは線形判別分析における理想的な分布パターンを示す(図-4)。Al ₂ O ₃ とRb、TiO ₂ とMgOは、2群を最大限に分ける直線の判別率がそれぞれ98%、100%と非常に高く、さらに活断層と非活断層のデータがこの直線に平行に分布する。これは、この直線の自由度が低く、判別式の安定性が高い(判別の確度が高い)ことを示しており、TiO ₂ だけでなく、Al ₂ O ₃ 、Rb、MgOも活断層と非活断層の違いを表す元素として重要であることが分かる。 このように、統計解析による結果から絞り込まれたTiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、MgO、CaO、Rbの5元素は、分布パターンから見ても花崗岩質岩類中の横ずれ活断層と非活断層の違いを表しており、そこから更に絞り込まれたAl ₂ O ₃ とRb、TiO ₂ とMgOの4元素は、それぞれの組み合わせも含め重要と考えられる。これらの元素の移動と断層活動との関連については更に検討する必要があるが、一般に流体中で移動しにくいとされるTiO ₂ ²¹⁾ や移動しやすいとされるRb ²¹⁾ が含まれていることを踏まえると、断層活動休止期間に溶脱と濃集の両方が生じている可能性が高いと考えられる。	4.2 活断層と非活断層の違いを表す元素について 共線性を除いたケース④の6元素の分布パターンは以下のようにまとめられる。TiO ₂ 、CaO、Na ₂ O、Sr、Baは非活断層のデータが活断層に比べて低い値の側に分布する。このうちTiO ₂ 、CaO、Na ₂ Oは非活断層データの分散が大きく、活断層データの分散が小さい。とくにTiO ₂ は、非活断層／活断層の分布範囲の重なりが最も小さく、判別係数と整合する。これに対して微量元素(Sr、Ba)は非活断層／活断層データのどちらも分散が大きい(図-3)。残るMnOは、活断層と非活断層の分布がほぼ重なっている(図-3)。2つの元素の組み合わせによる相関係数は、Na ₂ OとCaO、Na ₂ OとSrで特に活断層と非活断層の2群と高い相関を示す(図-3)。また、相関係数は高くはないが、TiO ₂ とNa ₂ O、MnOとSrの組み合わせは線形判別分析における理想的な分布パターンを示す(図-4)。2群を最大限に分ける直線の判別率は、TiO ₂ とNa ₂ Oの組み合わせで98%、MnOとSrで95%と非常に高く、活断層と非活断層のデータがこの直線に平行に分布する。これは、この直線の自由度が低く、判別式の安定性が高い(判別の確度が高い)ことを示している。このように、TiO ₂ だけでなく、MnO、Na ₂ O、Srといった元素も活断層と非活断層の違いを表す元素として重要であることが分かる。 以上のように、統計解析による結果から絞り込まれたTiO ₂ 、MnO、CaO、Na ₂ O、Sr、Baの6元素は、分布パターンから見ても花崗岩質岩類中の横ずれ活断層と非活断層の違いを表しており、そこから更に絞り込まれたTiO ₂ とNa ₂ O、MnOとSrの4元素は、それぞれの組み合わせも含め重要と考えられる。これらの元素の移動と断層活動との関連については更に検討する必要があるが、一般に流体中で移動しにくいとされるTiO ₂ ²¹⁾ や移動しやすいとされるSr ²¹⁾ が含まれていることを踏まえると、断層活動休止期間に溶脱と濃集の両方が生じている可能性が高いと考えられる。

訂正箇所: 109ページ

誤

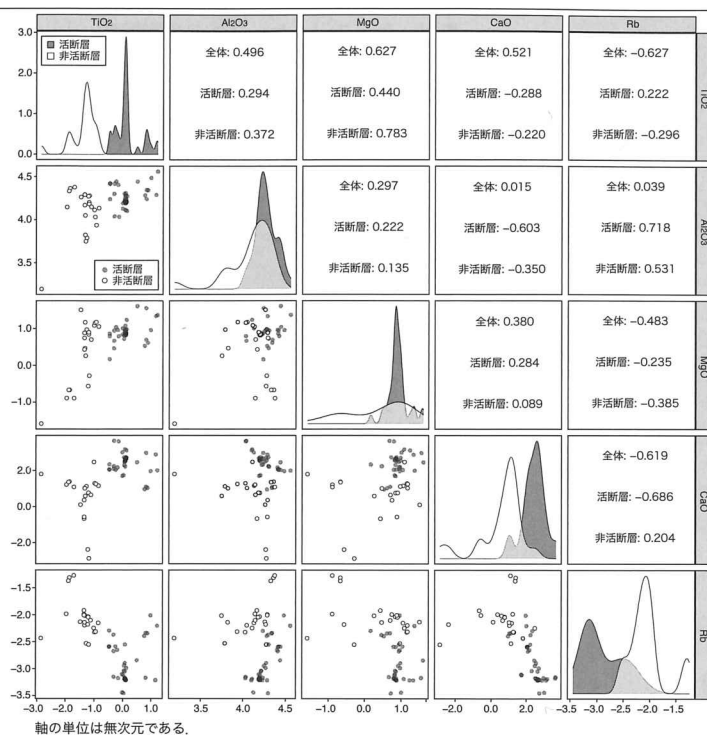


図-3 ケース③の5元素の分布と相関
ケース③の5元素の分布と相関をクロスプロットで示す。

正

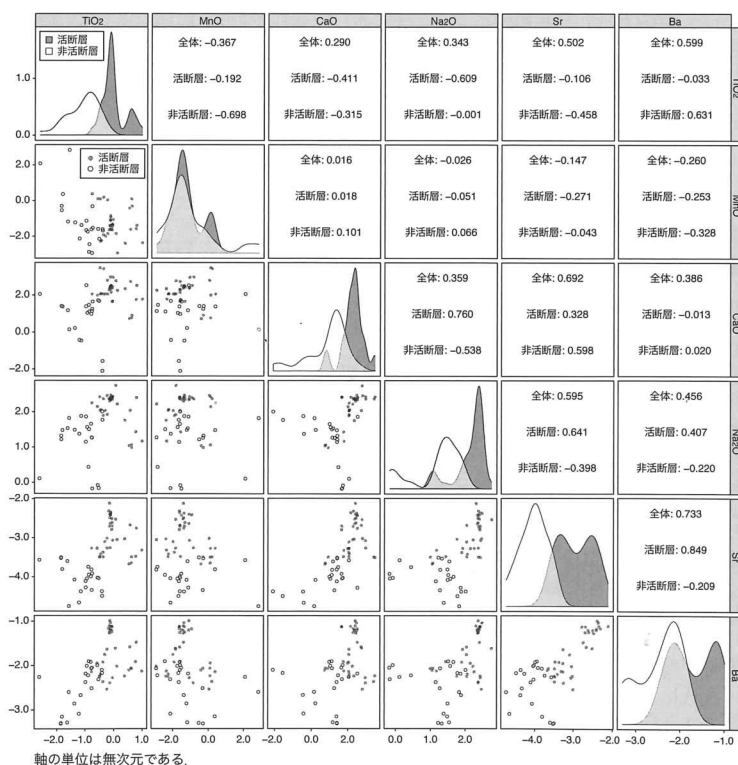
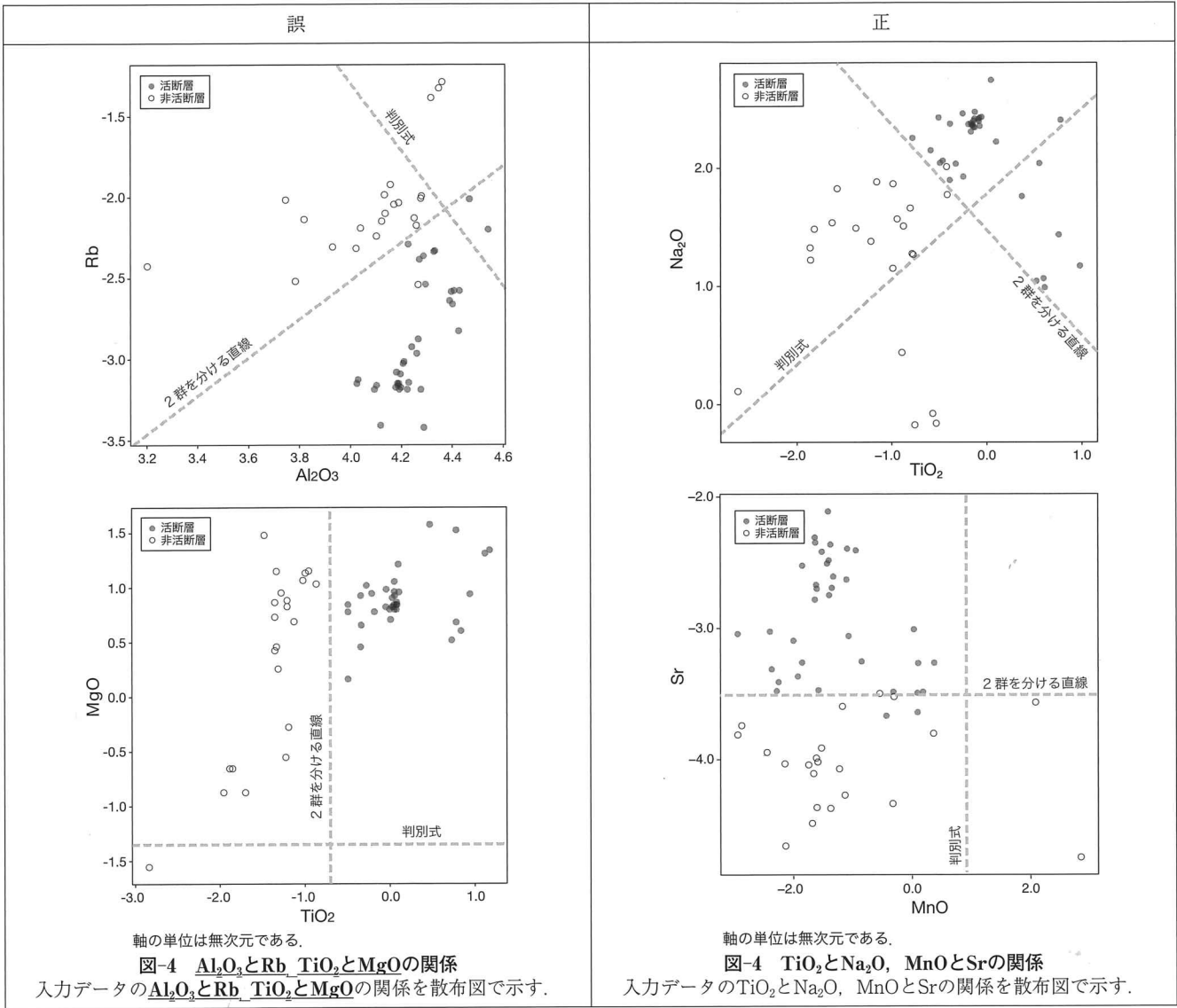


図-3 ケース④の6元素の分布と相関
ケース④の6元素の分布と相関をクロスプロットで示す。

訂正箇所：110ページ



訂正箇所：110ページ

誤	正
5. おわりに ～また、両者の違いを表す元素をTiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO、Rbの5つに絞り込むとともに、うち4つの元素のペア(Al₂O₃とRb、TiO₂とMgO)の分布から、判別の確度が高いことを示した。	5. おわりに ～また、両者の違いを表す元素をTiO₂、MnO、CaO、Na₂O、Sr、Baの6つに絞り込むとともに、うち4つの元素のペア(TiO₂とNa₂O、MnOとSr)の分布から、判別の確度が高いことを示した。