

土壌化学組成と母岩・気候条件の関係：主成分 分析と線形判別分析による検討

張 天逸¹・中西 寛子²

(受付 2025 年 6 月 3 日；改訂 9 月 30 日；採択 9 月 30 日)

要 旨

土壌形成には気温や降水量などの気候因子が強く影響するため、土壌の化学組成からその場の気候条件を推定する試みは多くなされてきた。しかし、土壌の化学組成には気候条件のみによって規定されるわけではなく、特に化学風化の程度が弱い環境では母岩の特性が強く反映されると考えられるが、従来モデルではほとんど考慮されてこなかった。そこで本研究では、土壌の化学組成が気候条件および母岩によってどのように特徴づけられるかを明らかにすることを目的に、異なる気候条件下で生成された世界各地の土壌試料の主要元素化学組成データを対象として、多変量解析を実施した。主成分分析(PCA)の結果、土壌化学組成は寒冷・乾燥から温暖・湿潤といった気候条件に加え、化学風化の進行度にかかわらず母岩の影響も強く受けていることが示された。また、母岩タイプの判別を目的とした線形判別分析(LDA)により、土壌の化学組成から母岩タイプが高精度に識別されることが明らかとなった。本研究結果は、温暖・湿潤環境で化学風化が進行した状況下においても、母岩の特性が土壌組成に反映されうること示しており、土壌化学組成を検討する際には気候要因と母岩タイプの影響を明確に区別して評価することで、従来モデルに内在していた潜在的なバイアスを低減できることを示唆する。

キーワード：組成データ、対数比解析、土壌化学組成、化学風化、PCA、LDA。

1. はじめに

土壌は、地球表層において岩石が風化作用を受けて生成される物質であり、その化学組成は母岩を出発物質とし、そこに加わる外的要因によって物理的・化学的な反応が進行した結果として形成される。土壌化作用は、鉱物の溶解・析出、植生・微生物活動、天水・地下水による物質の付加・溶脱などの多数の素過程が相互に影響しながら進行する複雑系であるが、これらは基本的に太陽エネルギーを起点とし、温度や降水量といった気候要因を介して土壌系にエネルギーが供給されることにより駆動される(Rasmussen et al., 2005)。このような背景から、土壌の化学組成から気温や降水量を推定するという試みはこれまでに多く行われており、実際古気候研究にも幅広く活用されてきた(例えば、Sheldon et al., 2002; Rasmussen and Tabor, 2007; Perri, 2018; Mangold et al., 2019; Deng et al., 2022)。しかしながら、先行研究のほとんどは、土壌化作用の出発条件となる母岩の違いをモデル化の際に考慮しておらず、古気候推定の文脈においても、後背地の化学的特性が時間的・空間的に不変であるという仮定のもとで議

¹ 早稲田大学 データ科学センター：〒169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1; tianct@fuji.waseda.jp

² 統計数理研究所：〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3; nmf.nakanishi@nifty.com

論されてきた。

本研究では、土壌の化学組成が気候条件(温度・降水量)および母岩タイプによってどのように特徴づけられるのかを明らかにすることを目的として、異なる気候帯および母岩条件下で形成された土壌の化学組成データに対し、探索的なデータ解析を実施した。明確な母岩情報を有し、かつ異なる気候帯に位置する405点の土壌試料について、バルク組成でパーセントオーダーに含まれる元素(主要元素)のデータを収集し、これらのデータに対して主成分分析および線形判別分析を適用することで、土壌化学組成と気候・母岩との関係性、ならびに土壌化学組成から母岩タイプ(玄武岩/花崗岩)の識別が可能かどうかを評価した。

2. 土壌のバルク化学組成データ

本研究では、異なる気候帯に存在する母岩が既知の土壌の主要成分に関する全岩化学組成データ($n = 405$)を収集した。対象としたデータは一般的な岩石や土壌にパーセントオーダーに含まれる SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O とした。土壌のサンプルは、アメリカ、プエルトリコ、ブラジル、アルゼンチン、マレーシア、中国、ロシア、スウェーデン、スイス、イタリア、カメルーン、ナイジェリア、エチオピアから得られたものである(USDA, 2009; Land et al., 1999; Norton and von Blanckenburg, 2010; Giovanoli et al., 1988; Dethier and Bove, 2011; Talabi, 2015; White et al., 1998; Yusoff et al., 2013; White et al., 2002; Bao and Zhao, 2008; Liu et al., 2016; Fu et al., 2019; Pokrovsky et al., 2005; Barbera et al., 2008; Manefouet Kentsa et al., 2023; Wu et al., 2021; Li et al., 2018; Liu et al., 2020; Le Blond et al., 2015; Caner et al., 2014; Campodonico et al., 2019; Yuan et al., 2022; Ma et al., 2007; Perri, 2020)。これら8元素(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O , K_2O)のうち、検出限界以下となったデータについては0.005 wt.%(質量パーセント)を代入して分析を行った。化学組成データに加えて、各土壌サンプルについて、その場の年平均気温、年間降水量のデータを、観測値に基づく高解像度気候データベース(WorldClim: Fick and Hijmans, 2017)から取得した。

今回用いた土壌の化学組成データの基本統計量を表1に示した。表から、各元素が含まれる割合は様々であるが、変動係数から Al_2O_3 が含まれる割合が最も安定していることがわかる。図1は土壌の化学組成データの対散布図である。花崗岩を母岩とする土壌と玄武岩を母岩とする土壌について、各元素の濃度範囲には重なりが認められ、単一元素の濃度のみから母岩を区別することが困難である一方、元素の組み合わせによっては領域の重なりが少ない組み合わせも存在することがわかる。また、 TiO_2 と Fe_2O_3 などいくつかの成分間に強い正の相関がみられる。一方で、外れ値も多数確認される。

組成データは、各成分(変数)の合計値が100%となる形式のデータである。組成データは自由度が成分の個数よりも少なくなるため、各成分の値は互いに依存しており、1つの成分が増

表1. 土壌の主要元素バルク組成データ(wt.%)の基本統計量。

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
平均値	48.32	2.44	21.05	14.98	1.35	1.36	0.64	1.08
中央値	47.17	2.50	20.19	14.15	0.77	0.37	0.18	1.00
標準偏差	14.67	1.36	5.09	7.88	1.81	2.52	0.88	0.99
変動係数	0.30	0.56	0.24	0.53	1.35	1.85	1.38	0.92

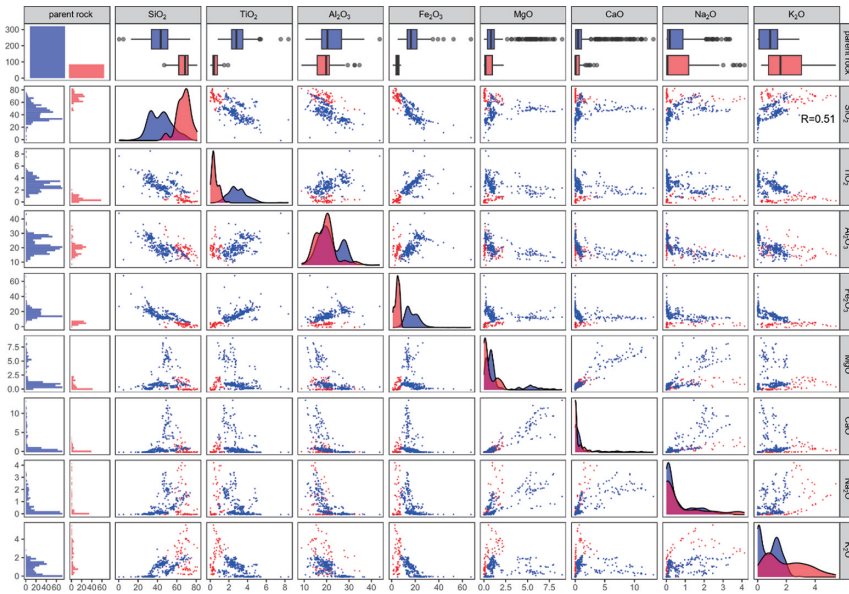


図 1. 土壌の主要元素全岩化学組成データの対散布図．赤色が花崗岩を母岩とする試料であり，青色が玄武岩を母岩とする試料を示す．

表 2. 化学組成データ (wt.%) を Al_2O_3 で規格化したデータの基本統計量．

	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
平均値	2.54	0.12	0.71	0.08	0.08	0.04	0.06
中央値	2.47	0.12	0.73	0.04	0.02	0.01	0.05
標準偏差	1.22	0.06	0.38	0.12	0.17	0.06	0.06
歪度	0.87	-0.07	4.79	2.63	3.07	1.89	1.85
尖度	1.70	0.04	55.85	7.47	10.51	3.14	4.34

加すれば、自動的に他の成分が相対的に減少する。したがって、組成データから 1 成分のみを取り出して変動を議論することは困難である (Aitchison, 1982; 太田, 2023)。また、このような閉じた性質 (成分の値の合計が一定値に制約される性質) は、通常の統計手法や多変量解析技術を直接適用する際にランク落ちの問題を引き起こすことがある。今回扱う土壌の化学組成データも組成データであるため、解析の前処理として、総和が 100% とならないような変数変換を行った。

Al_2O_3 は一般的な岩石や土壌に一定の割合以上に含まれており、多くの分析手法で精度よく定量値が得られる元素である。また、表 1 の考察で述べたように Al_2O_3 は組成データでの変動係数をもっとも小さいため、組成データ化前のデータの絶対量 (母岩に対する元素の移動量) における変動ももっとも小さいと考えられる。そのため、本研究では Al_2O_3 を規格化成分として選定した。 Al_2O_3 を用いて各元素の規格化 (= 各 8 元素の濃度/ Al_2O_3 の濃度) を行ったデータの基本統計量を表 2 に示した。 Fe_2O_3 , MgO , CaO について歪度、尖度ともに大きな値を示し

表 3. 化学組成データ(wt.%)を Al_2O_3 で規格化後対数変換を施したデータの基本統計量.

	SiO_2	TiO_2	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
平均値	0.80	-2.42	-0.49	-3.50	-4.50	-4.67	-3.71
中央値	0.90	-2.11	-0.31	-3.32	-3.96	-4.73	-2.99
標準偏差	0.57	0.96	0.62	1.52	2.48	1.92	1.83
歪度	-2.27	-2.23	-1.72	-0.43	-0.38	-0.03	-1.10
尖度	18.13	5.85	4.42	0.71	-0.60	-1.10	0.27

たため、 Al_2O_3 で規格化後の各変数に対数変換(= $\log(\text{各 8 元素の濃度}/\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ の濃度})$)を施したデータの基本統計量を表 3 に示した. SiO_2 が尖度 18.13 と大きな値を示した以外は、多くの元素について歪度、尖度がともに正規分布に近づく結果となり、元素間のバランスが改善された. 以上より、本研究の主成分分析では Al_2O_3 で規格化後に対数変換をしたデータを用いて解析を行った.

3. 主成分分析によるデータの特徴の探索

3.1 土壌化学組成データの主成分分析(全データ)

土壌の化学組成データの特徴と土壌と気候条件の関係を検討するために、主要元素を Al_2O_3 で規格化後に対数変換をしたデータについて主成分分析を行った. 範囲が最大の元素は CaO で 10.5, 最小の元素は Fe_2O_3 で 5.18 という様に、元素の濃度の散らばりに偏りがあるため、分析には相関行列を用いた. 第 1 主成分は寄与率 52.2%, 第 2 主成分は寄与率 33.3% となり、第 1 主成分と第 2 主成分での累積寄与率は 85.5% であった. 各主成分の固有ベクトルを表 4 に示した. 第 1 主成分(PC1)は図 2 のように温度(A)と降水量(B)の情報を追加することで、寒冷・乾燥地域と温暖・湿潤地域を示す軸であると考えられる. CaO , Na_2O , MgO , K_2O , SiO_2 は寒冷・乾燥地域での土壌に濃集しているが、これはこれらの元素が温暖・湿潤地域においては化学風化作用のために溶脱され、土壌中で枯渇する現象を反映した結果であると考えられる. 第 2 主成分(PC2)は玄武岩母岩(Δ)と花崗岩母岩(\square)の布置からこれらの母岩の違いを意味していると考えられ、固有ベクトルからは Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO は玄武岩を母岩にもつ土壌と関係し、 SiO_2 , K_2O は花崗岩を母岩にもつ土壌と関係していることがみられる. 事実、 Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO は苦鉄質鉱物に濃集する元素であり、 SiO_2 , K_2O は珪長質鉱物に濃集する元素である. したがって、今回検討した土壌データにおいて、化学風化作用に加えて母岩の影響も強く残っていることが明らかとなった. また、花崗岩を母岩とする土壌について、第 1 主成分スコアの増加に伴い第 2 主成分スコアが減少する一方で、玄武岩を母岩とする土壌では第 2 主成分スコアが増加するという傾向が見られた. これは化学風化がかなり進行した試料においても、母岩タイプの判別は可能であることを強く示唆している.

3.2 土壌化学組成データの主成分分析(土壌の母岩タイプで層別して分析)

本研究で収集したデータセットは花崗岩を母岩にもつ 78 の土壌と玄武岩を母岩にもつ 327 の土壌から構成されており、中間質の組成の岩石を母岩にもつ土壌は含まれていない. 3.1 節での主成分分析の結果より、母岩の化学組成に由来する差異がデータに大きな影響を与えてい

表 4. 土壌データの相関行列を用いた主成分分析の固有ベクトルと寄与率.

	PC1	PC2
SiO ₂	-0.359	-0.377
TiO ₂	-0.112	0.580
Fe ₂ O ₃	-0.080	0.602
MgO	-0.449	0.234
CaO	-0.492	0.045
Na ₂ O	-0.491	0.049
K ₂ O	-0.409	-0.316
寄与率	52.2%	33.3%

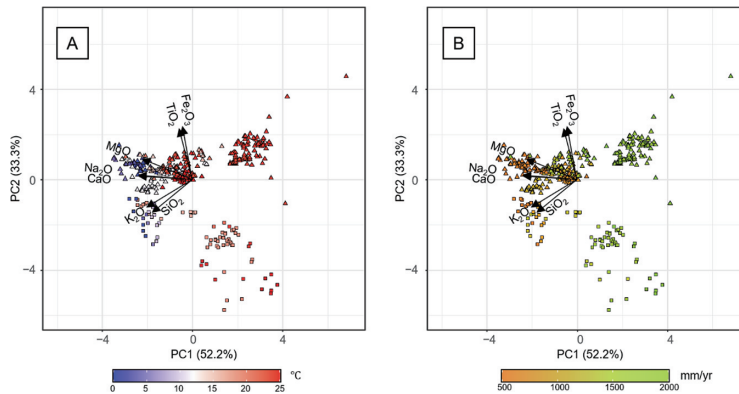


図 2. 土壌化学組成データの相関行列を用いた主成分分析結果のバイプロット (第 1 主成分と第 2 主成分). (A) 年平均気温により色分け. (B) 年間降水量により色分け.

ることが明らかとなったため、母岩の種類(花崗岩, 玄武岩)で層別して、再度、主成分分析を行った(表 5).

MgO, CaO, Na₂O, K₂O は花崗岩を母岩とする土壌, 玄武岩を母岩とする土壌で第 1 主成分に絶対値が大きい固有ベクトルを持つ。これらは風化で溶脱する元素であり、温度と降水量の情報を追加することで、寒冷・乾燥地域と温暖・湿潤地域を示す軸であると考えられる(図 3)。SiO₂ については玄武岩を母岩とする土壌において特に絶対値が大きい第 1 主成分の固有ベクトルを示す一方、花崗岩を母岩とする土壌では比較して絶対値が小さい第 1 主成分の固有ベクトルを示した。これは花崗岩に豊富に含まれる石英の他の鉱物に対する風化抵抗性を反映している可能性がある。Fe₂O₃ と TiO₂ について、玄武岩を母岩とする土壌では第 1 主成分とほとんど関係しない一方、花崗岩を母岩とする土壌では風化で溶脱する元素と同じ方向の寄与がある程度見られた。これは、強風化環境での花崗岩を母岩とする土壌でしばしば観察されるギブサイト Al(OH)₃ の濃集を伴うようなサンプルが影響している可能性が考えられる。

表 5. 母岩で層別したデータについての相関行列を用いた主成分分析の固有ベクトルと寄与率.

	花崗岩母岩土壌		玄武岩母岩土壌	
	PC1	PC2	PC1	PC2
SiO ₂	-0.203	-0.794	-0.435	-0.013
TiO ₂	-0.325	-0.176	0.022	-0.697
Fe ₂ O ₃	-0.308	-0.410	0.083	-0.700
MgO	-0.442	0.233	-0.431	-0.099
CaO	-0.433	0.277	-0.464	0.007
Na ₂ O	-0.447	0.158	-0.461	-0.106
K ₂ O	-0.420	0.122	-0.436	0.048
寄与率	62.6%	14.2%	58.8%	17.7%

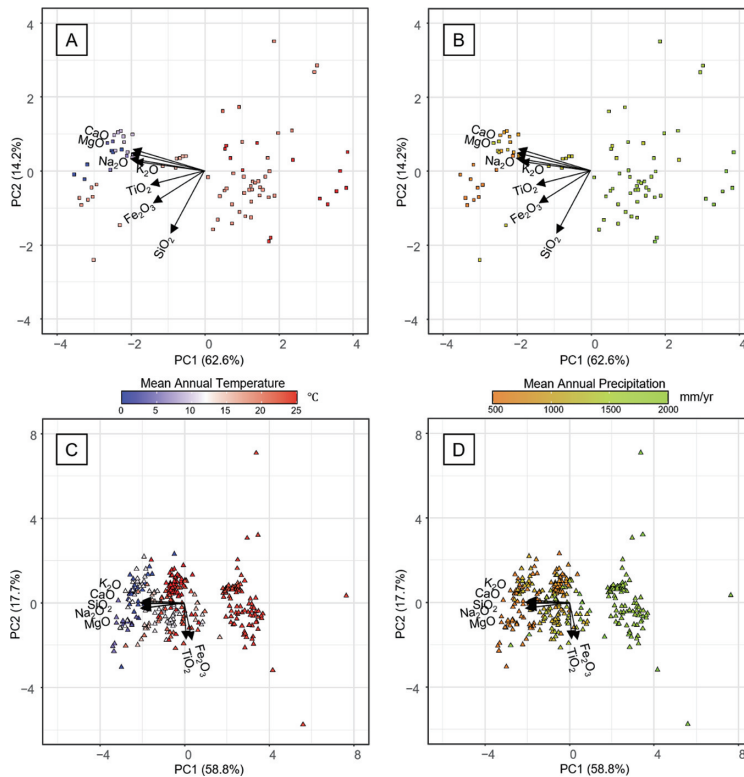


図 3. 母岩組成で層別した相関行列を用いた主成分分析結果のバイプロット(第1主成分と第2主成分). (A) (B) 母岩が花崗岩の試料についての分析結果. (C) (D) 母岩が玄武岩の試料についての分析結果.

以上より、花崗岩を母岩とする土壌、玄武岩を母岩とする土壌に関わらず、第1主成分は温暖・湿潤地域と寒冷・乾燥地域を分離する傾向が強く認められた。したがって、本研究で使用したデータセットについて、気候要因が土壌の化学組成の差異をもたらしていることが改めて示唆された。

4. 線形判別分析による土壌化学組成からの母岩の推定

母岩で層別せずに行った分析について、「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」による主成分分析における第2主成分の固有ベクトルの結果から、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 MgO は玄武岩を母岩にもつ土壌と関係し、 SiO_2 、 K_2O は花崗岩を母岩にもつ土壌と関係していることがみられた。次に、玄武岩を母岩とする土壌と花崗岩を母岩とする土壌は化学組成を用いて判別可能か、またどの元素が判別に寄与するかを調べることを目的として、線形判別分析を行った。変数変換が判別精度に与える影響を検討するために、分析は「組成データ」、「 Al_2O_3 で規格化したデータ」、「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」の3通りについて行った。判別精度は、見かけ上の誤判別率(全データに占める誤分類数の割合)によって評価した。

その結果、「組成データ」、「 Al_2O_3 で規格化したデータ」、「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」の見かけ上の誤判別率は、それぞれ 1.5%、1.5%、2.2% となり、いずれも高い精度で判別が可能であった(表6)。各元素の変動が判別関数に与える影響を、p 値を用いて評価した結果を順次述べる。

表 6. 花崗岩母岩土壌と玄武岩母岩土壌の各変数変換データにおける線形判別分析結果.

	LD1_wt. %		LD1_X/ Al_2O_3		LD1_log(X/ Al_2O_3)	
	判別係数	p 値	判別係数	p 値	判別係数	p 値
SiO_2	0.060	3.9×10^{-9}	0.489	1.5×10^{-9}	0.377	3.4×10^{-2}
TiO_2	-0.872	2.0×10^{-31}	-21.266	1.2×10^{-49}	-1.020	2.2×10^{-22}
Al_2O_3	0.162	2.6×10^{-13}	-	-	-	-
Fe_2O_3	-0.005	7.5×10^{-1}	-0.594	5.5×10^{-3}	-1.589	9.5×10^{-20}
MgO	-0.251	1.2×10^{-2}	-4.747	3.7×10^{-3}	0.148	7.8×10^{-2}
CaO	0.013	8.7×10^{-1}	1.143	3.6×10^{-1}	-0.461	4.8×10^{-15}
Na_2O	0.169	1.8×10^{-1}	-0.175	9.3×10^{-1}	0.244	6.5×10^{-4}
K_2O	0.342	1.0×10^{-3}	4.621	5.2×10^{-3}	0.297	3.9×10^{-6}
判別値 (花崗岩母岩)	> 5.35		> -0.528		> 4.26	
見かけ上の誤判別率	1.5 %		1.5 %		2.2 %	

LD1_wt. %: 組成データでの分析. LD1_X/ Al_2O_3 : Al_2O_3 で規格化したデータでの分析.
 LD1_log(X/ Al_2O_3): Al_2O_3 で規格化後に対数変換したデータでの分析.

「組成データ」を用いた場合は、判別関数の値の増加に寄与する有意な元素 (p 値 <0.05)は、 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O という珩長質鉱物に濃集する元素が該当した。判別関数の値の減少に寄与する有意な元素は、 TiO_2 , MgO という苦鉄質鉱物に濃集する元素が該当した。 Fe_2O_3 は SiO_2 との相関係数が -0.84 であり、 CaO は MgO との相関係数が 0.94 であることから、これらは有意な元素から省かれ、 \pm の符号についても不安定であることが見て取れる。

「 Al_2O_3 で規格化したデータ」を用いた場合は、判別関数の値の増加に寄与する有意な元素は、 SiO_2 , K_2O という珩長質鉱物に濃集する元素が該当した。判別関数の値の減少に寄与する有意な元素は、 TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO の苦鉄質鉱物に濃集する元素が該当した。 CaO は MgO との相関係数が 0.95 であることから有意な元素から省かれ、 \pm の符号についても不安定であることが見て取れる。

「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」については、判別関数の値の増加に寄与する有意な元素は、 SiO_2 , Na_2O , K_2O が該当し、判別関数の値の減少に寄与する有意な元素は、 TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO が該当した。 MgO は CaO や Na_2O との相関係数が 0.82 , 0.83 であることや CaO と Na_2O の相関係数が 0.86 であることから互いの関係が深く、 MgO が有意な元素から省かれたと考えられる。上記3つの異なるデータ前処理方法での分析について、判別精度に違いは認められず、いずれも見かけ上の誤判別率ではあるが2%程度の高い精度で母岩が判別された。

「組成データ」, 「 Al_2O_3 で規格化したデータ」および「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」のいずれにおいても MgO , CaO , Na_2O は有意でないことや符号が反転することなどから判別分析に寄与する元素ではない可能性が高い。そこで、これら3元素を除外したデータセットで再度、線形判別分析を行った結果を表7に示した。見かけ上の誤判別率はそれぞれ1.7%, 0.2%, 2.7%となり、8元素すべてを含むデータセットと比べて、「組成データ」と「 Al_2O_3 で規格化した後に対数変換をしたデータ」では見かけ上の誤判別率がわずかに上昇し、「 Al_2O_3 で規格化したデータ」ではわずかに減少したが、見かけ上の誤判別率であるため、意味のある違いとは考えられない。よって、 MgO , CaO , Na_2O は他の主要元素データの存在下では土壤の

表7. MgO , CaO , Na_2O を除外したデータでの花崗岩母岩土壤と玄武岩母岩土壤の各変数変換データにおける線形判別分析結果.

	LD1_wt.%		LD1_X/ Al_2O_3		LD1_log(X/ Al_2O_3)	
	判別係数	p 値	判別係数	p 値	判別係数	p 値
SiO_2	0.077	5.0×10^{-16}	0.315	1.9×10^{-5}	0.522	1.5×10^{-3}
TiO_2	-0.805	1.4×10^{-28}	-21.137	3.7×10^{-49}	-1.015	2.9×10^{-22}
Al_2O_3	0.214	2.1×10^{-31}	-	-	-	-
Fe_2O_3	0.008	6.3×10^{-1}	-0.974	2.3×10^{-6}	-1.661	1.6×10^{-23}
K_2O	0.471	2.8×10^{-8}	4.737	6.1×10^{-4}	0.008	8.7×10^{-1}
判別値 (花崗岩母岩)	> 7.95		> -1.00		> 4.92	
見かけ上の誤判別率	1.7%		0.2%		2.7%	

母岩タイプの判別に寄与しないと結論づけられる。特に CaO と Na₂O は風化の初期段階から容易に溶脱し、化学風化の進行程度を最も鋭敏に反映する元素であるため、これらの元素が母岩判別に寄与しないという結果は、風化プロセスに関する既存の知見とも整合的である (Ohta et al., 2007; Buggle et al., 2011)。

5. 結論

高温・高圧の地球内部で生成された岩石は、低温・低圧の地球表層環境に晒されることで、鉱物の分解・再結晶を経て土壌を形成する。特に、温暖かつ湿潤な環境では化学風化が促進され、土壌の化学的特徴に大きな影響を与えるため、古土壌や陸源性碎屑岩は、その生成環境での気候条件を推定するための記録媒体として活用されてきた。本研究では、異なる気候帯に発達する土壌データについて、主成分分析により化学組成の特徴を探索的に解析し、また花崗岩を母岩とする土壌と玄武岩を母岩とする土壌は化学組成を用いて判別が可能であるか、判別に寄与する元素はなにかを線形判別分析により検討した。これらの解析の結果、気候要因により促進される化学風化とともに母岩も土壌の化学組成を特徴づける主要因であり、風化が進行した試料においても母岩が土壌化学組成に影響を与えていることが示された。

従来、風化度に基づく気候復元の研究においては、上部大陸地殻の平均組成である花崗岩質を後背地と想定して議論することが多かった。しかしながら、本研究の結果は、このような仮定に基づく解析では、母岩の化学組成の影響と化学風化の効果とを区別できず、その結果、気候変動と後背地の地質的变化が同時に生じた場合、それぞれの影響が混在したまま評価され、母岩の差異が気候推定値に系統的なバイアスをもたらしている可能性を示唆している。特に、巨大火成岩岩石区 (LIPs) の出現や山脈隆起に伴う環境変動イベントにおいては、後背地が変化し、堆積物の母岩が変化することは十分考えられるため、母岩の変化が堆積物の化学組成に与える影響は適切に評価されるべきである。

また、本研究で用いたデータには定量限界未満の値を 0.005 wt.% として扱ったが、組成データにおけるこのような小さい値の取り扱いについては理論的基盤が十分とは言えない (Greenacre, 2021)。今後は、平方根変換 (中西, 2003) や Box-Cox 変換の利用など、定量限界未満の値や 0 値を含む組成データを適切に処理可能な解析手法の整備が求められる。

謝 辞

統計数理研究所の水田正弘教授には組成データ解析に関して日頃より貴重なご助言を賜り、原稿について有益なアドバイスをいただいた。統計数理研究所の三輪哲久教授には組成データ解析に関して日頃より貴重なご助言を賜った。また、匿名査読者 2 名と編集者のコメントにより本論文は大きく改善された。本研究の一部に JSPS 科研費 25K17503 を使用した。本研究は文部科学省事業「統計エキスパート人材育成プロジェクト」で得られた成果を発展させたものである。

参 考 文 献

- Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, **44**, 139–160.
- Bao, Z. and Zhao, Z. (2008). Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China, *Ore Geology Reviews*, **33**, 519–535.

- Barbera, V., Raimondi, S., Egli, M. and Plötze, M. (2008). The influence of weathering processes on labile and stable organic matter in Mediterranean volcanic soils, *Geoderma*, **143**, 191–205.
- Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N. and Marković, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess–paleosol studies, *Quaternary International*, **240**, 12–21.
- Campodonico, V. A., Pasquini, A. I., Lecomte, K. L., García, M. G. and Depetris, P. J. (2019). Chemical weathering in subtropical basalt-derived laterites: A mass balance interpretation (Misiones, NE Argentina), *Catena*, **173**, 352–366.
- Caner, L., Radtke, L. M., Vignol-Lelarge, M. L., Inda, A. V., Bortoluzzi, E. C. and Mexias, A. S. (2014). Basalt and rhyo-dacite weathering and soil clay formation under subtropical climate in southern Brazil, *Geoderma*, **235–236**, 100–112.
- Deng, K., Yang, S. and Guo, Y. (2022). A global temperature control of silicate weathering intensity, *Nature Communications*, **13**, 1781.
- Dethier, D. P. and Bove, D. J. (2011). Mineralogic and geochemical changes from alteration of granitic rocks, Boulder Creek Catchment, Colorado, *Vadose Zone Journal*, **10**, 858–866.
- Fick, S. E. and Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *International Journal of Climatology*, **37**, 4302–4315.
- Fu, W., Li, X., Feng, Y., Feng, M., Peng, Z., Yu, H. and Lin, H. (2019). Chemical weathering of S-type granite and formation of Rare Earth Element (REE)-rich regolith in South China: Critical control of lithology, *Chemical Geology*, **520**, 33–51.
- Giovanoli, R., Schnoor, J. L., Sigg, L., Stumm, W. and Zobrist, J. (1988). Chemical weathering of crystalline rocks in the catchment area of acidic Ticino lakes, Switzerland, *Clays and Clay Minerals*, **36**, 521–529.
- Greenacre, M. (2021). Compositional data analysis, *Annual Review of Statistics and Its Application*, **8**, 271–299.
- Land, M., Ingri, J. and Öhlander, B. (1999). Past and present weathering rates in northern Sweden, *Applied Geochemistry*, **14**, 761–774.
- Le Blond, J. S., Cuadros, J., Molla, Y. B., Berhanu, T., Umer, M., Baxter, P. J. and Davey, G. (2015). Weathering of the Ethiopian volcanic province: A new weathering index to characterize and compare soils, *American Mineralogist*, **100**, 2518–2532.
- Li, J., Gong, Q., Yan, T., Li, R., Liu, N. and Cen, K. (2018). Quantitative description of geochemical backgrounds of gold due to rock weathering in Jiaodong peninsula, China, *Journal of Geochemical Exploration*, **192**, 155–162.
- Liu, J., Zhou, L., Algeo, T. J., Wang, X., Wang, Q., Wang, Y. and Chen, M. (2020). Molybdenum isotopic behavior during intense weathering of basalt on Hainan Island, South China, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **287**, 180–204.
- Liu, W., Liu, C., Brantley, S. L., Xu, Z., Zhao, T., Liu, T., Yu, C., Xue, D., Zhao, Z. and Cui, L. (2016). Deep weathering along a granite ridgeline in a subtropical climate, *Chemical Geology*, **427**, 17–34.
- Ma, J., Wei, G., Xu, Y., Long, W. and Sun, W. (2007). Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **71**, 3223–3237.
- Manefouet Kentsa, B. I., Kamgang Kabeyene, V., Tamen, J., Nzolang, C. and Ndjigui, P. (2023). Geochemistry of major elements in soil-saprolite of different rocks in a microclimate of the Bambouto Mountains (Cameroon), *Applied Geochemistry*, **154**, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105701>.
- Mangold, N., Dehouck, E., Fedo, C., Forni, O., Achilles, C., Bristow, T., Downs, R. T., Frydenvang, J., Gasnault, O., L’Haridon, J., Le Deit, L., Maurice, S., McLennan, S. M., Meslin, P.-Y.,

- Morrison, S., Newsom, H. E., Rampe, E., Rapin, W., Rivera-Hernandez, F., Salvatore, M. and Wiens, R. C. (2019). Chemical alteration of fine-grained sedimentary rocks at Gale crater, *Icarus*, **321**, 619–631.
- 中西寛子 (2003). 都道府県別選挙得票率からわかること—統計的データ分析の例として—. *オペレーションズ・リサーチ*, **48**, 17–22.
- Norton, K. P. and Von Blanckenburg, F. (2010). Silicate weathering of soil-mantled slopes in an active Alpine landscape, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **74**, 5243–5258.
- 太田 亨 (2023). 『組成データ解析入門：パーセント・データの問題点と解析方法』, 朝倉書店, 東京.
- Ohta, T. and Arai, H. (2007). Statistical empirical index of chemical weathering in igneous rocks: A new tool for evaluating the degree of weathering, *Chemical Geology*, **240**, 280–297.
- Perri, F. (2018). Reconstructing chemical weathering during the Lower Mesozoic in the Western-Central Mediterranean area: A review of geochemical proxies, *Geological Magazine*, **155**, 944–954.
- Perri, F. (2020). Chemical weathering of crystalline rocks in contrasting climatic conditions using geochemical proxies: An overview, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **556**, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109873>.
- Pokrovsky, O. S., Schott, J., Kudryavtzev, D. I. and Dupré, B. (2005). Basalt weathering in Central Siberia under permafrost conditions, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 5659–5680.
- Rasmussen, C. and Tabor, N. J. (2007). Applying a quantitative pedogenic energy model across a range of environmental gradients, *Soil Science Society of America Journal*, **71**, 1719–1729.
- Rasmussen, C., Southard, R. J. and Horwath, W. R. (2005). Modeling energy inputs to predict pedogenic environments using regional environmental databases, *Soil Science Society of America Journal*, **69**, 1266–1274.
- Sheldon, N. D., Retallack, G. J. and Tanaka, S. (2002). Geochemical climofunctions from North American soils and application to Paleosols across the Eocene-Oligocene boundary in Oregon, *The Journal of Geology*, **110**, 687–696.
- Talabi, A. O. (2015). Weathering of meta-igneous rocks in parts of the basement terrain of Southwestern Nigeria: Implications on groundwater occurrence, *International Journal of Scientific and Research Publications*, **5**, 1–17.
- USDA (2009). National soil characterization data. Lincoln, NE, Soil Survey Laboratory, National Soil Survey Center, Soil Conservation Service, <http://soils.usda.gov/survey/nscd/> (最終アクセス日 2025 年 10 月 1 日).
- White, A. F., Blum, A. E., Schulz, M. S., Vivit, D. V., Stonestrom, D. A., Larsen, M., Murphy, S. F. and Eberl, D. (1998). Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico: I. Long-term versus short-term weathering fluxes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, 209–226.
- White, A. F., Blum, A. E., Schulz, M. S., Huntington, T. G., Peters, N. E. and Stonestrom, D. A. (2002). Chemical weathering of the Panola Granite: Solute and regolith elemental fluxes and the weathering rate of biotite, *Water Rock Interactions, Ore Deposits, and Environmental Geochemistry: A Tribute to David A. Crerar* (eds. R. Hellmann and S. A. Wood), Special Publication 7, 37–59, The Geochemical Society, Alexandria, Virginia.
- Wu, Y., Li, X., Gong, Q., Wu, X., Yao, N., Peng, C., Chao, Y., Wang, X. and Pu, X. (2021). Test and application of the geochemical lithogene on weathering profiles developed over granitic and basaltic rocks in China, *Applied Geochemistry*, **128**, <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104958>.
- Yuan, W., Gong, Y., Chen, J., Wang, Z., Huang, F., Yang, X., Chetelat, B., Teng, H. and Schott, J. (2022). Gallium isotope constraints on the intense weathering of basalt, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **333**, 22–38.

- Yusoff, Z. M., Ngwenya, B. T. and Parsons, I. (2013). Mobility and fractionation of REEs during deep weathering of geochemically contrasting granites in a tropical setting, Malaysia, *Chemical Geology*, **349**, 71–86.

Geochemical Signatures of Soils in Relation to Parent Rock and Climatic Conditions: A Principal Component and Linear Discriminant Approach

Tenichi Cho¹ and Hiroko Nakanishi²

¹Center for Data Science, Waseda University

²The Institute of Statistical Mathematics

Soil formation is strongly influenced by climatic factors such as temperature and precipitation, suggesting that the chemical composition of soils can serve as a proxy for reconstructing past climatic conditions. However, soil chemistry is not solely governed by climate, and the influence of parent rock properties may become pronounced particularly under conditions of limited chemical weathering. To better understand how soil chemistry is related to climatic conditions and parent rock types, we performed multivariate analyses on chemical composition data from soils formed under diverse climatic regimes. Principal component analysis (PCA) revealed that soil chemical composition is strongly influenced by climatic conditions and, irrespective of the degree of chemical weathering, by parent rock composition. Linear discriminant analysis (LDA) further demonstrated that parent rock type can be accurately identified based on soil chemical composition. Our findings demonstrate that parent rock characteristics are preserved in soil composition even under conditions of intense chemical weathering, and highlight the necessity of incorporating parent rock composition into climate estimation models to reduce biases associated with variations in source rock composition.