

論 文

ボリビア東部平原地帯, オキナワ移住地における
土壌断面形態と堆積母材の諸特性について

高田裕介*1・近藤鍊三*2・小林進介*3・筒木 潔*2・谷 昌幸*2

キーワード: 一次鉱物組成, 数値分類, 主要元素組成, 土壌断面形態, 粘土鉱物組成

1. はじめに

ボリビア共和国は南米大陸のほぼ中央部に位置しており, アンデス山脈を中心とした標高 3000m 以上の高原, 西部山脈の南東部に沿った標高 2000 ~ 3000m の溪谷, および標高 300 ~ 500m の東部平原地帯の 3 地勢帯に大別される。ボリビア共和国は 1965 年から国内の人口増加を支えるための食糧増産を目的として, 高原および溪谷地帯から東部平原地帯に位置するサンタクルス平原地帯への国民移動方針 (内国植民政策) を取り決めた (松崎ら, 1974)。その結果, 現在では, サンタクルス州はボリビア共和国の一大穀倉地帯に変貌しつつある。

サンタクルス市から北東に約 50km 離れた地点にはオキナワ移住地という日系集団移住地が所在する。オキナワ移住地は 1956 年からの入植以来, 基本的に無肥料による作物生産を続けてきた。しかし, 入植当時と比較して, 栽培管理, 作物品種改良など, 農業技術の改良に伴い, より集約的かつ収奪的な農業へと移行している。近年, 本地域では収奪型農業から持続的農業への変換を目指して, 畜作輪換や緑肥作物の導入などを視野に入れた合理的な土地利用および土壌有機物管理に関心が高まりだした。

合理的な土地利用および有機物管理形態の確立には, 調査地域内の土壌の特性を把握する必要がある。しかし, オキナワ移住地において, 基礎的な土壌調査を行った事例はほとんどなく, 土壌の特性に関する基礎的な情報がきわめて不足している。

オキナワ移住地は集水域の異なる河川の氾濫原に位置しており, 移住地土壌の性質はそれら河川の氾濫堆積母材の質に直接的に依存することが予想される。また, 異なる集水域の河川の影響を受けて成立したオキナワ移住地域において, 堆積母材の性質を評価することは, 河川氾濫堆積物の地域的変異を検討する上で極めて重要であるばかりでなく, 土壌肥沃度に関連する基礎情報を得ることができる。例えば, Kawaguchi and Kyuma (1977) は熱帯アジア各地から採取した水田土壌を試料として, 粒径組成および全元素分析を行い, 土壌材料区分を立て, 材料区分と土壌の肥沃度の性質との関連性を指摘した。また, 加藤ら (2000) は日本各地の沖積土壌の元素組成を明らかにし, 既存の土壌分類との対応関係について検討を行い, 肥沃度評価に堆積母材の元素組成を考慮に入れる必要性を示した。

そこで本研究では, オキナワ移住地において, 土壌断面形態を明らかにし, その形態と一次鉱物組成, 粘土鉱物組成, および細砂画分の元素組成の関係を明らかにすると共に, それら地域的変異について検討した。

2. 材料および方法

1) 調査地域概況

研究対象地域としてボリビア共和国サンタクルス州に位置するオキナワ移住地 (南緯 17°20', 西経 62°54', 標高 240 ~ 320m) を選定した。

調査地域の年平均気温は 23.8°C (最寒月平均気温: 19.9°C, 年降水量: 1293mm) であり, Köppen の気候区

*1 京都大学大学院農学研究科 (京都府京都市左京区北白川追分町)

*2 帯広畜産大学 (北海道帯広市稲田町西 2 線 11)

*3 国際協力事業団 (東京都渋谷区代々木 2 丁目 1 番 1 号)

2003 年 8 月 18 日受付・2003 年 12 月 22 日受理

分では熱帯季節風気候区分 (Am) に属する。移住地にはグランデ川とパイロン川が流れており、移住地西方40~50kmの位置にピライ川が流下している(図1)。オキナワ移住地とその周辺地域の土壌は主にグランデ川の氾濫堆積物を母材として生成したが、一部の地域はパイロン川およびピライ川の氾濫堆積物の影響を受けているとみられる。移住地内の標高差は最大で80mであり、移住地北部で低く、南部で高い。パイロン川以北では、グランデ川とパイロン川との標高差がほとんどなく、沖積氾濫堆積物が地表全面を覆っている。とくに、グランデ川とパイロン川に挟まれた地帯のほぼ中央部に位置するN3およびE2地点付近で標高は最も低く、両河川に近づくにつれて標高は徐々に高くなるよう凹状地形を呈している。一方、移住地南部では尾根部標高がグランデ川よりも20m以上高く、本河川の氾濫の影響が北部に比べて小さく、土壌の風化年代

が移住地北部に比べて長いと推測される。

2) 調査地点および分析方法

土壌断面調査地点を図1に示した。土壌断面調査と各層位の土壌試料採取を、N1~N12地点については2001年8月~2001年9月に行い、E1~E4地点については2002年4月に行った。

風乾細土 (<2mm) を調製し、粒径分析および細砂画分の主要元素組成の分析を行った。粒径組成は、過酸化水素水で有機物を分解し、超音波処理を行い、1mol L⁻¹ 水酸化ナトリウムを加えて分散させた後、篩別法と沈定法により求めた。分画した細砂画分については1000°Cで灰化し、灰化試料0.3000gを秤量し、3.0000gのホウ酸リチウムと混合した後、融解しガラスビードを作成した。このガラスビードについて、蛍光X線分析装置 (Rigaku System 3070) で主要元素組

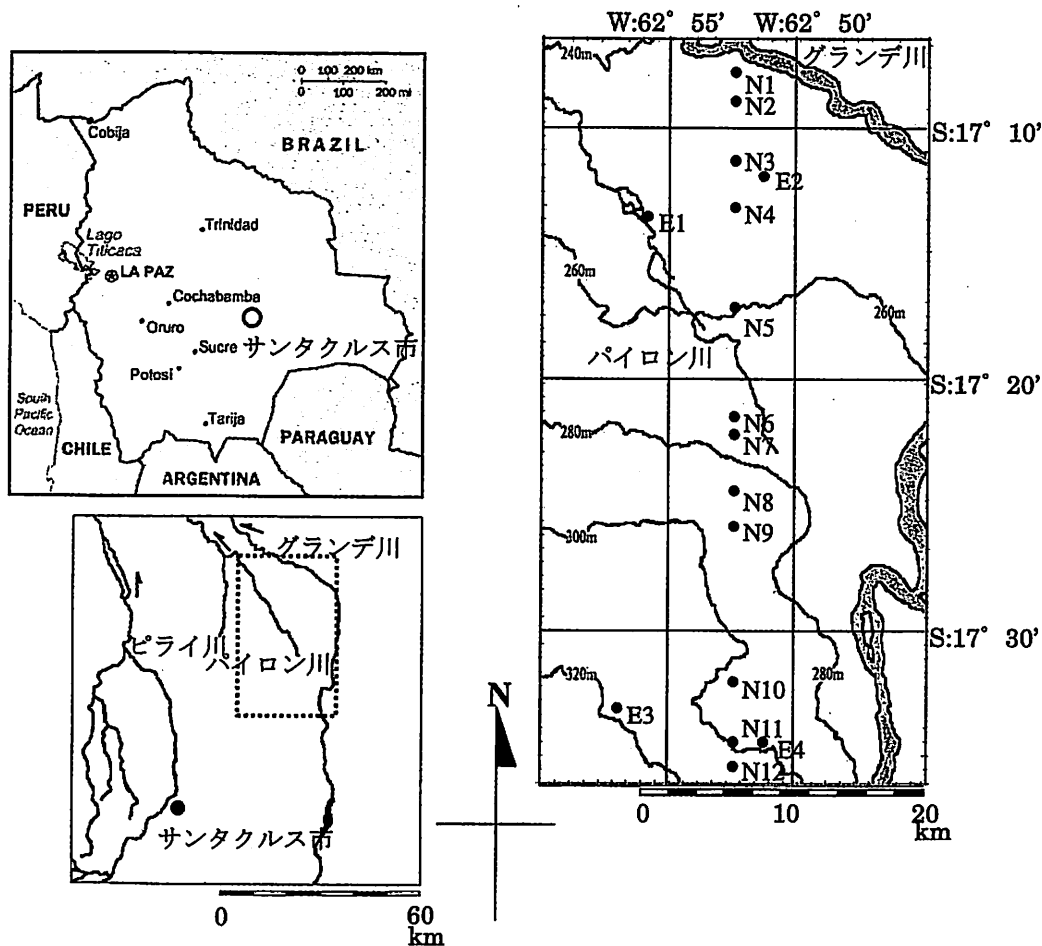


図1 オキナワ移住地の位置および土壌断面調査地点

成 (Si, Al, Fe, Ti, Mn, Mg, Ca, K, Na, および P) を求めた。得られた主要元素組成のデータについて主成分分析, クラスタ分析の順に統計解析を行った。解析には統計解析ソフト STATISTICA5.1 を用いた。

N2, N3, N6, N8, および N12 地点で採取した試料については, さらに細砂画分と粘土画分の X 線分析を行った。分画した細砂画分は脱鉄処理後 (Mehra and Jackson, 1960), メノウ乳鉢で 30 秒間磨砕し, 不定方位試料を作成し, X 線回折 (Shimadzu XD-3A) に供試した。粘土画分は脱鉄処理後, Mg 飽和粘土および K 飽和粘土の不定方位試料を作成し, X 線回折に供試した (和田, 1966)。

3. 結果と考察

1) 土壌断面形態によるグループ化

表 1 に各調査地点の土壌断面形態を示した。パイロン川以北に位置する N1~N5, および E1~E2 地点の土色は 10YR ~ 7.5YR を示したが, パイロン川以南の N9 地点以外の地点では, 下層土の土色は 5YR~2.5YR であった。また, N8, N10, N11, N12, および E4 地点において粘土集積層が観察された。

土壌断面形態を特徴付ける層位の土色および土性に基づき, 調査地域の特徴的土壌型を下記の 4 グループに分けた。

土壌断面グループ 1: 土色は 10YR ~ 7.5YR, 土性は S~CL と粗粒質から中粒質であり, 層位分化の未発達な土壌断面で特徴づけられる。N1, N2, N4, N5, および N9 地点の土壌がこのグループに属する。なお, N4 地点において, 表層土壌の土性のみは LiC であったが, 他の下層土壌の土性が粗粒質から中粒質であったことから, 本地点は土壌断面グループ 1 に属すると考えた。

土壌断面グループ 2: 土色は 10YR ~ 7.5YR, 土性は CL ~ HC と中粒質から細粒質であり, 層位分化の未発達な土壌断面で特徴づけられる。N3, E1, および E2 地点の土壌がこのグループに属する。なお, 本土壌断面グループはグライ層によっても特徴づけられた。

土壌断面グループ 3: 断面下層の土色は 5YR, 土性は S~CL と粗粒質 ~ 中粒質な土壌断面で特徴づけられる。N6, N7, および E3 地点の土壌がこのグループに属する。

土壌断面グループ 4: 断面下層の土色は 5YR ~ 2.5YR, 土性は CL ~ HC と中粒質 ~ 細粒質であり, 粘土集積を

持つ赤褐色層の土壌断面で特徴づけられる。N8, N10, N11, N12, および E4 地点の土壌がこのグループに属する。土壌断面グループ 1 および 2 は主にパイロン川以北に分布し, 土壌断面グループ 3 および 4 はパイロン川以南に分布していた。

2) 土壌断面形態グループの地域的変異

パイロン川以北には, 層位分化の未発達な土壌断面グループ 1 および 2 が主に分布していた。とくに, 両河川に挟まれた地帯の中央部では細粒質な土壌断面グループ 2 が分布する傾向であった。本地帯は凹状地形を呈しており, 土壌断面グループ 2 が位置する地点は標高が比較的低い傾向であった。

パイロン川以南の各地点では赤褐色層位によって特徴付けられる土壌断面グループ 3 および 4 が主に分布していた。しかし, パイロン川南側で細区分された各土壌型の地形的変異については今回の調査の中で不明瞭であった。今後の課題として, パイロン川南部で細分した土壌の地形的変異の検討が必要と考えられた。

3) 代表土壌断面の 1 次鉱物組成

表層および下層土壌の 1 次鉱物組成を図 2 に示した。

表層土壌の X 線回折の結果, 全試料に 0.210, 0.224, 0.229, 0.247, 0.335, および 0.427 nm のピークが認められた。N2 および N3 地点において 0.319 nm の僅かなピークが見られ, N2, N6, および N12 地点では 0.326 nm のピークが検出された。0.210 および 0.229 nm のピークは方解石, 0.224 および 0.247 nm のピークはカンラン石, 0.319 nm のピークは斜長石, 0.326 nm のピークはカリ長石, 0.335 および 0.427 nm のピークは石英にそれぞれ帰属する (丸茂, 1993)。また, N3 地点のみに, 0.714 および 1.016 nm のピークが認められ, それぞれ緑泥石および雲母鉱物と判定した (丸茂, 1993)。

下層土壌の X 線回折の結果, 全試料で方解石, カンラン石, および石英に帰属するピークがみられた。N2, N3, N6, および N12 地点では斜長石, N6, N8, および N12 地点ではカリ長石に帰属するピークがそれぞれ検出された。また, N2 および N3 地点においてのみ緑泥石および雲母鉱物に帰属するピークが認められた。

パイロン川以北の N2 および N3 地点では, 雲母鉱物と緑泥石が同定され, また, 斜長石のピーク強度がカリ長石よりも強い傾向にある。一方, パイロン川以南の N6, 8, および 12 地点では雲母鉱物と緑泥石のピーク

表1 各調査地点の土壌断面形態

地点名	層位名	深さ (cm)	土色	砂	シルト (%)	粘土	土壌断面 グループ	主要元素 クラスター	Soil Taxonomy
N1	A	0 ~ 5	7.5YR4/3.5	53.6	36.0	10.3	1	IV	Typic Ustifluvents
	C	5 ~ 12	10YR4/4	64.0	25.1	11.0			
	2C1	12 ~ 16	7.5YR4/2.5	52.8	33.2	14.0			
	2C2	16 ~ 26	10YR5/3	71.2	23.7	5.07			
	3C	26 ~ 80	10YR4/4	71.0	24.6	4.34			
N2	Ap	0 ~ 12	10YR4/2	42.3	40.9	16.8	1	IV	Typic Ustifluvents
	C1	12 ~ 30	10YR4/4	55.2	37.9	6.80			
	C2	30 ~ 68	10YR4/4	89.1	7.89	2.97			
	2C	68 ~ 80	7.5YR4/4	82.1	15.2	2.76			
N3	Ap	0 ~ 5	10YR4/4	1.28	37.9	60.8	2	III	Typic Fluvaquents
	Cg1	15 ~ 43	7.5YR4.5/5	3.26	35.5	61.2			
	Cg2	43 ~ 80	10YR4/4	0.36	39.6	60.0			
N4	Ap	0 ~ 20	10YR4/2	23.4	41.7	34.9	1	IV	Typic Fluvaquents
	BCg	20 ~ 40	10YR4/6	26.0	63.3	10.7			
	2Cg1	40 ~ 45	7.5YR4/3	35.5	48.6	16.0			
	2Cg2	45 ~ 80	10YR4/4	67.9	25.0	7.12			
N5	Ap	0 ~ 22	10YR4/4	60.7	28.2	11.1	1	IV	Typic Ustifluvents
	C1	22 ~ 35	10YR5/6	58.5	32.7	8.78			
	C2	35 ~ 59	10YR5/3	70.2	24.5	5.31			
	2C	59 ~ 80	10YR5.5/4	48.6	43.8	7.62			
N6	Ap	0 ~ 22	10YR4/4	79.9	9.90	10.2	3	II	Fluentic Haplustepts
	C1	22 ~ 55	7.5YR5/4	78.0	12.0	10.0			
	C2	55 ~ 65	5YR5/3	75.7	13.9	10.4			
	2Bw	65 ~ 80	5YR4/3	69.2	13.0	17.8			
N7	Ap	0 ~ 25	7.5YR4/3.5	76.0	14.1	9.91	3	II	Fluentic Haplustepts
	C	25 ~ 45	5YR4/3.5	72.0	15.0	13.0			
	2Bw1	45 ~ 67	5YR4/5	66.2	15.0	18.8			
	2Bw2	67 ~ 80	5YR4/6	64.4	14.4	21.2			
N8	A	0 ~ 5	10YR3/2.5	18.0	31.0	51.1	4	I	Salidic Natrustalfs
	Btg1	5 ~ 29	10YR4/2	17.6	27.3	55.1			
	Btng2	29 ~ 40	2.5YR6/1	12.1	25.5	62.4			
	Btgz3	40 ~ 55	2.5YR5/2	16.1	28.1	55.7			
	2Btgz	55 ~ 64	2.5YR6/3	6.30	29.5	64.2			
N9	Ap	0 ~ 12	10YR3/3.5	87.3	7.66	5.07	1	II	Typic Ustifluvents
	C	2 ~ 33	10YR4/6	87.4	6.99	5.57			
	2C1	33 ~ 41	10YR4/4	89.0	6.50	4.47			
	2C2	41 ~ 52	7.5YR5/3.5	90.1	5.78	4.09			
	3C	52 ~ 80	10YR5/4	88.5	7.98	3.51			
N10	Ap	0 ~ 18	7.5YR4/3	33.5	28.2	38.4	4	I	Salidic Natrustalfs
	Bt1	18 ~ 35	5YR4/2	18.3	27.8	53.9			
	2Btz1	35 ~ 47	2.5YR5/4	17.3	28.2	54.4			
	2Btz2	47 ~ 80	2.5YR4/4	18.8	25.7	55.5			
N11	Ap	0 ~ 20	5YR4/2	24.9	38.4	36.6	4	I	Typic Haplustalfs
	Bt1	20 ~ 50	2.5YR4/4	18.4	29.8	51.9			
	Bt2	50 ~ 64	5YR5/6	17.8	40.4	41.7			
	BC	64 ~ 80	5YR4/4	25.0	45.4	29.6			
N12	Ap	0 ~ 15	10YR7/2	44.2	32.4	23.4	4	I	Salidic Natrustalfs
	Btm1	15 ~ 34	5YR3.5/6	33.8	27.3	38.9			
	Btz2	34 ~ 73	5YR4/8	29.1	34.0	36.9			
	BC	73 ~ 80	5YR4/5	47.0	28.9	24.1			
E1	Apg	0 ~ 15	10YR5/2	21.5	32.3	46.2	2	IV	Typic Fluvaquents
	Cg	15 ~ 35	10YR4/4	1.48	40.9	57.6			
	2Cg1	35 ~ 51	10YR4/6	0.59	33.9	65.5			
	2Cg2	51 ~ 80	10YR4/6	0.55	45.3	54.1			
E2	Ap	0 ~ 19	7.5YR4/4	4.18	48.4	47.4	2	IV	Salidic Natrustalfs
	Btgn1	19 ~ 27	10YR4/4	1.25	56.6	42.1			
	Btgz2	27 ~ 40	7.5YR4/4	1.62	43.2	55.2			
	2Cg	40 ~ 80	10YR5/4	71.9	21.1	6.98			
E3	Ap	0 ~ 12	7.5YR4/4	75.5	13.6	10.9	3	II	Fluentic Haplustepts
	BC	12 ~ 25	5YR4/4	75.5	14.2	10.3			
	C	25 ~ 36	5YR5/7	75.3	15.0	9.71			
	2Bw1	36 ~ 69	5YR4/3	78.7	13.5	7.79			
	2Bw2	69 ~ 80	5YR4/3	75.0	14.2	10.9			
E4	Ap	0 ~ 22	10YR3/4	37.7	33.5	28.8	4	I	Aquic Haplustalfs
	Btg1	22 ~ 29	10YR6/6	37.3	31.8	30.9			
	Btg2	29 ~ 37	7.5YR4/4	32.4	26.2	41.4			
	2Btg1	37 ~ 47	5YR4/6	31.3	26.4	42.3			
	2Btg2	47 ~ 80	2.5YR4/4	28.7	28.3	42.9			

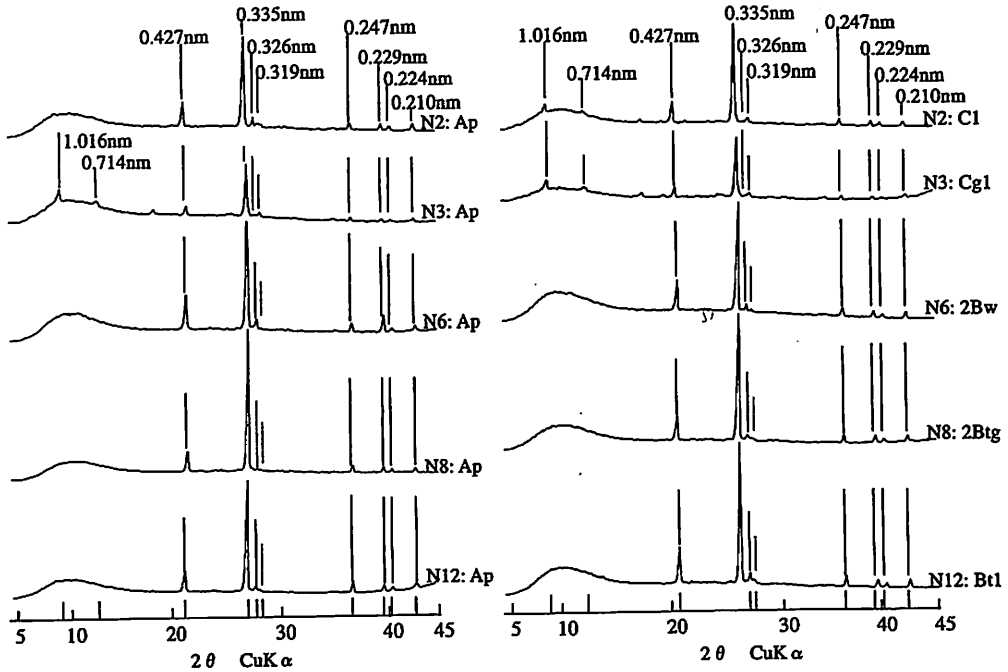


図2 細砂画分のX線回析図 (左:表層土壌, 右:下層土壌)

クは検出されず、カリ長石のピーク強度が斜長石よりも強い傾向にあった。

以上の結果から、パイロン川以北とパイロン川以南では細砂画分中の一次鉱物組成に違いが認められた。

4) 代表土壌断面の粘土鉱物組成

表層および下層土壌の粘土鉱物組成を図3に示した。

表層土壌において、全試料で0.72および1.01 nmのピークが認められた。0.72 nmのピークはK飽和-550℃加熱処理で消失したことからカオリナイトと判定された。1.01 nmのピークはMg飽和-グリセロール処理で不変なことからイライトと同定された。N2, N3, およびN6地点で1.4 nm付近にピークが認められ、Mg飽和-グリセロール処理で変わらず、また、K飽和-300℃加熱処理で1.0 nmのピークの反射が強まることからパーミキュライトと同定された。N8地点の1.4 nm付近のピークはMg飽和-グリセロール処理により、1.7 nm付近に移行したことからスメクタイトと同定された。N12地点では1.4 nm付近にピークは認められなかった。相対的なピーク強度を見ると、N2, N3, およびN6地点では、イライト、カオリナイト、およびパーミキュライトの順であり、N8地点では、イライト、カオリナイト、およびスメクタイトの順であった。N12

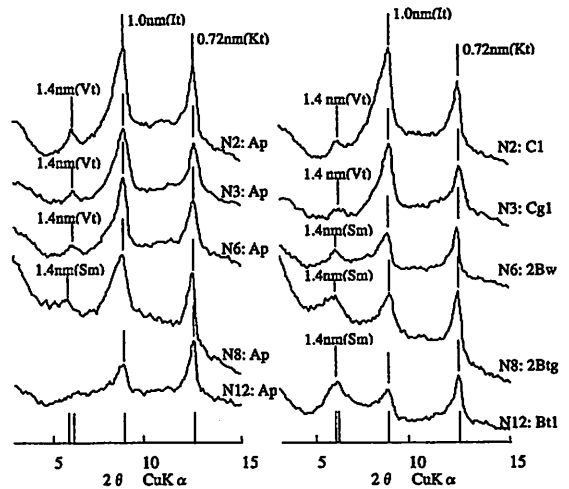


図3 Mg飽和粘土試料のX線回析図
(左:表層土壌, 右:下層土壌)

Vt:パーミキュライト, Sm:スメクタイト,
It:イライト, Kt:カオリナイト

地点のみカオリナイトのピーク強度がイライトよりも強かった。

下層土壌の全試料で0.72および1.01 nmのピークが確認され、各処理からこれらのピークをそれぞれ、カオリナイトおよびイライトと同定した。各処理により

N2 および N3 地点の 1.4 nm 付近のピークはパーミキュライト、また、N6, N8, および N12 地点の 1.4 nm 付近のピークはスメクタイトとそれぞれ同定された。相対的なピーク強度は、N2 および N3 地点においてイライト、カオリナイト、パーミキュライト、N6, N8, および N12 地点においてカオリナイト、イライト、スメクタイトの順にそれぞれ高かった。

パイロン川以北の N2 および N3 地点では、相対ピーク強度はイライト、カオリナイト、パーミキュライトの順に高い傾向にあった。一方、パイロン川以南の各地点では赤褐色層位が観察されており、それら層位の粘土鉱物組成はイライトの風化産物として考えられるスメクタイトのピーク強度がイライトよりも強い傾向にあった。また、これらの層位では最終風化産物であるカオリナイト(久馬, 1969)のピーク強度がイライトおよびスメクタイトのピーク強度よりも強い傾向にあった。

以上の結果から、パイロン川以北とパイロン川以南では粘土鉱物組成にも明らかな違いが認められ、赤褐色層が出現するパイロン川以南がパイロン川以北に比べてより強度に風化の影響を受けていた。また、土壌断面グループ 4 における代表土壌断面 N12 下層土の X 線回折図が、土壌断面グループ 3 における代表土壌断面 N6 下層土と比較して、カオリナイトの相対反射強度が増加していた。本結果から、土壌断面グループ 4 が土壌断面グループ 3 と比較して、脱珪酸作用をより強

く受けていると考えた。

5) 細砂画分の主要元素組成の平均値と元素間の相関係数

細砂画分中の主要元素組成の平均値、標準偏差、および変動係数を表 2 に示した。

移住地土壌の細砂画分中、最も多い元素は SiO₂ で、852 g kg⁻¹ (平均値) と著しく高く、ついで Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O, MgO, TiO₂, および CaO の順で 3.39 ~ 74.6 g kg⁻¹ の範囲にあった。他方、MnO₂ と P₂O₅ は 1 g kg⁻¹ 以下と極めて低かった。これらの元素の変動係数は Fe₂O₃, P₂O₅, MnO₂, CaO, および MgO で高く、SiO₂ で最も低い値であった。この結果は、Fe₂O₃, P₂O₅, および MnO₂ 含量が土壌水分環境の影響に依存されやすいと言われており、移住地の地形面と堆積物特性との対応関係を考える上で興味深い。また、MgO と CaO の変動係数が高かったが、移住地土壌には方解石が含まれており、堆積母材中の Mg・Ca 含有鉱物量の違いが細砂画分の元素組成を反映しているのだろう。

表 3 に細砂画分中の主要元素の相関係数行列を示した。

SiO₂ と他の 9 元素の間には負の相関係数があった。とくに、それらの間で相関係数が高い元素は、相関係数の絶対値の大きい順に Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, および P₂O₅ である。また、Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, P₂O₅, TiO₂, および K₂O との間で正の高い相関係数が認めら

表 2 細砂画分中の主要元素組成の平均値および標準偏差

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
平均値 (g kg ⁻¹)	852	74.6	28.8	4.62	0.90	4.75	3.39	23.3	7.00	0.88
標準偏差	96.4	47.8	33.4	2.03	1.80	3.40	3.28	7.03	2.07	1.09
変動係数 (%)	11.4	64.5	117	44.3	201	72.1	97.5	30.4	29.8	124

表 3 細砂画分中の主要 10 元素の相関係数行列 (n=69)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
SiO ₂	1.000									
Al ₂ O ₃	-0.994**	1.000								
Fe ₂ O ₃	-0.982**	0.961**	1.000							
TiO ₂	-0.845**	0.859**	0.820**	1.000						
MnO ₂	-0.713**	0.684**	0.711**	0.482**	1.000					
MgO	-0.977**	0.981**	0.938**	0.898**	0.665**	1.000				
CaO	-0.520**	0.496**	0.466**	0.378**	0.469**	0.590**	1.000			
K ₂ O	-0.876**	0.874**	0.838**	0.519**	0.680**	0.799**	0.452**	1.000		
Na ₂ O	-0.421**	0.452**	0.361**	0.693**	0.126	0.504**	0.137	0.110	1.000	
P ₂ O ₅	-0.950**	0.927**	0.968**	0.740**	0.639**	0.892**	0.482**	0.856**	0.307*	1.000

** 危険率 1% で有意, * 5% で有意

れた。CaO および Na₂O は他の元素との相関関係が比較的良かった。沖積土壌中の元素組成を検討した Kyuma and Kawaguchi (1976) および加藤ら (2000) によると、土壌中の主要元素間の相関関係は、SiO₂ と K₂O が正の相関を持ち、他の8つの元素はすべて負の相関関係を持ったことを報告している。本結果では、これらの報告とやや異なる傾向がみられ、SiO₂ と正の相関関係を示す元素はなかった。この理由として、前述した一次鉱物組成の結果から、石英が全ての試料で優占しており、細砂画分中の SiO₂ の起源が主に石英に由来していることが挙げられる。

6) 主要元素組成の主成分分析とクラスター分析

移住地土壌の堆積母材の特性を数値的に区分するために、細砂画分中の主要元素組成データを基に主成分分析を行った (表4)。

主成分分析では、固有値1以上の主成分を2つ抽出することができた。第1主成分と第2主成分の固有値はそれぞれ7.31 および1.23であり、第1主成分の寄与率は第2主成分の約6倍であった。累積寄与率は、第2主成分までで85.4%と極めて高い値となった。

第1主成分では、SiO₂以外すべての元素が正の値となり、とくに SiO₂ と負の相関関係が高い苦鉄質元素の Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、および P₂O₅ で固有ベクトルは大きかった。この結果から、第1主成分は母材の鉱物特性が苦鉄質あるいは石英質を表していると考えられる。従って、苦鉄質元素が高いほど第1主成分得点は大きい傾向にある。

表4 元素組成を用いた主成分分析による固有ベクトルと因子負荷量

	固有ベクトル		因子負荷量	
	第1主成分	第2主成分	第1主成分	第2主成分
SiO ₂	-0.37	0.01	-1.00	0.02
Al ₂ O ₃	0.37	0.03	0.99	0.03
Fe ₂ O ₃	0.36	-0.04	0.97	-0.05
TiO ₂	0.32	0.40	0.86	0.44
MnO ₂	0.27	-0.31	0.74	-0.35
MgO	0.36	0.08	0.98	0.09
CaO	0.21	-0.23	0.57	-0.26
K ₂ O	0.32	-0.32	0.86	-0.36
Na ₂ O	0.17	0.75	0.45	0.83
P ₂ O ₅	0.35	-0.10	0.94	-0.11
固有値	7.31	1.23		
寄与率 (%)	73.1	12.3		
累積寄与率 (%)	73.0	85.4		

第2主成分では、Na₂O が大きな正の固有ベクトル、K₂O および MnO₂ が比較的大きい負の固有ベクトルをそれぞれ持っていた。前述したように、細砂画分の X 線回折図にはナトリウムを含む斜長石のピークと、カリウムを含む雲母鉱物およびカリ長石のピークが認められた。このことから第2主成分は細砂画分中の含 Na 鉱物と含 K 鉱物の存在割合を示していると考えられる。また、MnO₂ が大きな負のベクトル持っていたが、MnO₂ は遊離酸化物として細砂画分粒子を被覆していると推測され (若月ら, 1978)、土壌環境のおかれた水分条件の違いも反映していると考えられる。

主要元素組成に基づいた細砂画分の数値分類を行うために、Ward 法によるクラスター分析を行った。距離計算にはユークリッド距離を用い、クラスターの分割数は4とした。クラスター分析で得られた樹形図を図4に示した。

クラスター I に属する試料数は24、クラスター II は17、クラスター III は6、およびクラスター IV は22であった。樹形図から移住地土壌の細砂画分はクラスター I・II とクラスター III・IV に大別された。

各試料の主成分得点を算出し、4つの主要元素組成クラスターと主成分得点の関係を図5に示した。

図では、各主成分得点の平均値を点で、標準偏差を X と、Y 軸方向の幅で示した。図5の X 軸は石英質-苦鉄質の系列とした第1主成分得点であり、主成分得点の平均値はクラスター II < クラスター I < クラスター IV < クラスター III の順であった。また、クラスター I・II の主成分得点の平均値は負の値をとり、クラスター III・IV で正の値をとったことから、移住地土壌の細砂画分は石英質なクラスター I・II と苦鉄質なクラスター III・IV の2つに大別されることが明らかとなった。第2主成分得点の平均値が正の値をとったのはクラスター IV のみであった。

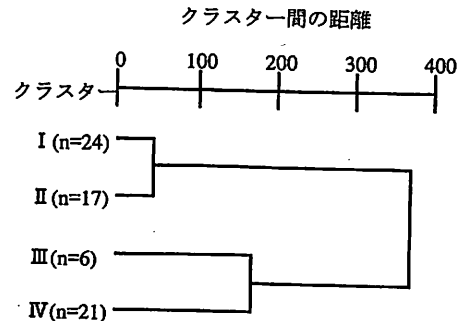


図4 主要元素組成によるクラスター分析の樹形図

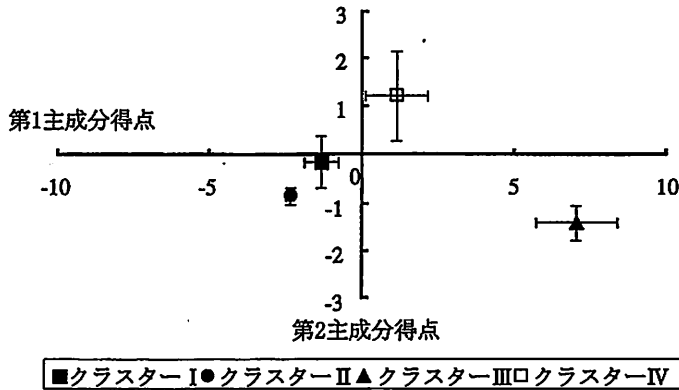


図5 主要元素組成クラスターと主成分得点の関係

表5に各クラスターにおける細砂画分元素組成の平均値を示した。

第1主成分得点の平均値が高い値を示したクラスターⅢでは、他のクラスターに比べて特異的な主要元素組成の構成を示し、とくに Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、および P_2O_5 の平均値は他のクラスターと比較して極めて高かった。クラスターⅢに所属する土壌断面の層位配列はパイロン川以北に分布する重粘質土壌に共通的であり、断面上層から鉄の斑紋が観察された。 Fe_2O_3 および MnO_2 (付随して P_2O_5) は遊離酸化物中に安定して存在する元素であり、また、土壌水分条件・酸化還元反応に強く影響を受けやすい元素でもある(若月1978)。これら遊離酸化物が細砂画分の粒子を被覆した結果として、細砂画分中の Fe_2O_3 、 MnO_2 、および P_2O_5 含有量がきわめて高くなったと推測される。

7) 土壌断面形態および主要元素組成クラスターの地域的変異

土壌断面形態と主要元素組成クラスターの関係を表1に示した。

パイロン川以北において、層位分化の未発達な土壌断面グループ1および2が分布しており、それら土壌の細砂画分中の主要元素組成クラスターでは、より苦

鉄質なクラスターⅢ・Ⅳの層位配列を示した。また、砂質土壌断面グループ1は主にクラスターⅣのみの層位配列を示し、粘土質土壌断面グループ2は主にクラスターⅢおよびクラスターⅣによる層位配列を示した。

一方、パイロン川以南では赤褐色層位によって特徴付けられる土壌断面グループ3および4が主に分布しており、細砂画分中の主要元素組成クラスターでは、石英質なクラスターⅠ・Ⅱの層位配列を示した。全層砂質で下層に赤褐色層を有する土壌断面グループ3は主にクラスターⅡのみの層位配列を示した。また、全層粘土質で、下層に赤褐色層を持つ土壌断面グループ4は主にクラスターⅠのみの層位配列を示していた。

以上の結果から、細砂画分の主要元素組成クラスターによる土壌断面のグループ化は、移住地において土壌断面形態の違いを反映していることが明らかとなった。また、前述したように、パイロン川以北に位置する代表土壌断面はイライトを主要とした粘土鉱物組成であったが、パイロン川以南に位置する代表土壌断面ではカオリナイトを主要とした粘土鉱物組成であった(図3)。そして、パイロン川以北において検出された雲母鉱物および緑泥石はパイロン川以南からは検出されなかった(図2)。

表5 各元素クラスターにおける主要元素組成の平均値

元素 クラスター	試料数	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MnO_2	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	P_2O_5
		$g\ kg^{-1}$									
I	24	900	50.2	10.7	3.14	0.36	2.74	2.86	22.2	6.90	0.49
II	17	930	35.6	4.37	2.90	0.10	1.88	1.67	19.4	4.28	0.00
III	6	594	199	119	7.99	5.30	12.8	7.25	43.5	7.09	3.78
IV	22	808	97.5	42.9	6.65	0.91	6.95	4.25	22.0	9.18	1.21

以上の結果から、移住地土壌における堆積母材の性質はパイロン川を境に一変することが明らかとなり、本地域における土壌断面形態は一次鉱物組成、粘土鉱物組成、および細砂画分の主要元素組成の結果を反映していることが示された。

4. 要約

ボリビア共和国、東部平原地帯に位置するオキナワ移住地において、土壌肥沃度に関する基礎的情報を得るために、土壌断面形態と堆積母材の諸特性の関連性について検討を行った。

土壌断面形態と堆積母材の諸特性は移住地北部と南部で大きく異なっていた。北部では層位分化の未発達な土壌が分布しており、カンラン石、方解石、斜長石、カリ長石、石英、緑泥石および雲母鉱物主体の一次鉱物組成であった。一方、パイロン川以南では下層に赤褐色を有する土壌が分布しており、カンラン石、方解石、斜長石、カリ長石および石英主体の一次鉱物組成であった。移住地北部の粘土鉱物組成は主に、イライト、カオリナイト、およびパーミキュライト主体の粘土鉱物組成であり、南部では、下層においてカオリナイト、イライト、およびスメクタイト主体の粘土鉱物組成であった。

細砂画分中の主要元素組成データを基に主成分分析およびクラスター分析を行った結果、移住地北部に分布する土壌断面は主に苦鉄質なクラスター、パイロン川以南では主に石英質なクラスターの層位配列をそれぞれ示した。また、細砂画分の主要元素組成クラスターによるグループ化は土壌断面形態の違いをよく反映していた。

謝辞

本調査を進めるにあたり、多大なる御支援を頂いた

国際協力事業団 (JICA) ・ボリビア総合農業試験場および JICA ボリビア事業所の職員の方々に厚く御礼申し上げます。また、現地調査中様々な御援助、御協力を頂いたオキナワ移住地民の皆様に深く感謝いたします。

引用文献

- 加藤邦彦・小原 洋・中井 真・東照雄 2000. 日本の沖積土壌における元素組成—その地域性および農耕地土壌分類との関係—, 土肥誌, 71: 143-153.
- Kawaguchi, K. and Kyuma, K. 1977. Paddy soils in Tropical Asia, their material nature and fertility. Univ. Press of Hawaii, Honolulu.
- 久馬一剛 1969. 東南アジアにおける赤色土壌の類別, 分布および生成について, 東南アジア研究, 7: 163-176.
- Kyuma, K. and Kawaguchi, K. 1976. Soil material classification for paddy soils in Japan. Soil Sci. Plant Nutr., 22: 114-124.
- 松崎照雄・渡辺英樹・石沢登志男 1974. 社会環境編 IV. ボリビア, 南米農業要覧, 海外移住事業団編, pp. 107-114, 全国農業改良普及協会, 東京.
- 丸茂義輝 1993. 一次鉱物同定法—X線回折法, 第四紀試料分析法, 日本第四紀学会編, pp. 90-98, 東京大学出版会, 東京.
- Mehra, O. P. and Jackson, M. I. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays Clay Miner., 7: 317-327.
- 若月利之・片山幸士・石田紀郎・松尾嘉郎 1978. 沖積および洪積土壌の風化過程における諸元素の挙動 (第1報) 三つの風化度指標—RM, HM, およびOM, 土肥誌, 49: 32-38.
- 和田光史 1966. 粘土鉱物の同定および定量法, 土肥誌, 37: 7-17.

Relationship between the morphological characteristics of soil profiles and the property of sedimentary parent material at the Okinawa Settlement, The Low land zone of East Bolivia

Yusuke TAKATA, Renzo KONDO, Shinsuke KOBAYASHI,
Kiyoshi TSUTSUKI and Masayuki TANI

Keywords : clay mineral, elemental composition, numerical classification, primary minerals, soil profile

Summary

The relationship between the morphological features of soil profiles and the properties of sedimentary parent material were studied in the Okinawa Colony, the low land zone of East Bolivia. The morphology of soil profile and the property of sedimentary parent material were significantly different between in the northern and southern parts of the Okinawa Colony. In the northern areas, regosols were dominant, and olivine, calcite, plagioclase, potassium feldspar, quartz, chlorite, and mica were main constituents of primary minerals. On the contrary, in the southern areas, red-brown soils were dominant, and olivine, calcite, plagioclase, potassium feldspar, and quartz were main constituents of primary minerals. The composition of clay minerals was also different between the north and the south parts. Illite, vermiculite, and kaolinite were main components of clay minerals in the north, and kaolinite, smectite, and illite were main components in the south. The differences in main elemental composition of fine-sand particles, which were clarified by principal component analyses and cluster analyses, indicated that the profiles characterized as the siliceous cluster were mainly distributed in the north. Contrarily in the south, the profiles characterized as the felsic cluster were mainly distributed.