

論文

松江市に分布する“川津赤色粘土”について(予察)

石賀 裕明*・山崎 静子**・宇野 敦美*・道前 香緒里***・武蔵野 実****

“Kawatsu Red Clay” distributed in Matsue City, Southwest Japan
(Preliminary Report)

Hiroaki Ishiga*, Chikako Yamazaki**, Atumi Uno*, Kaori Dozen*** And Makoto Musashino****

Abstract

Red clay distributed in the northern Matsue City is a peculiar red (9 R 5/3-1 YR 4/3), and is characterized by higher Al_2O_3 contents (over 30 wt%) compared with normal soils. CIA (chemical index of alteration) values given by molar portions of $Al/(Al+Na+Ca+K) \times 100$ are over 90, suggestive of significant weathering for the parent material. Although the color of this clay and CIA values are suggestive of dominant iron oxides or hydro-oxides. A possible parent material is alkaline basalt of the Matsue Formation, but chondrite-normalized REE patterns of the Kawatsu red clay are characterized by relatively gentle inclination with negative Ce/Ce* and Eu/Eu* anomalies. The negative Ce* anomaly can result from explained REE alteration under reducing conditions. The Eu/Eu* negative anomaly can be explained by mixing of alkaline basalt and evolved material such as the Tertiary sediments which also occur in this district.

Key words: REE, red clay, weathering, Quaternary, geochemistry, Matsue

はじめに

松江市西川津町の丘陵には赤色粘土が分布する。これらは極めて特徴的な赤色を呈する。このような土壌の色調は熱帯多雨地域で形成される赤色土壌(松井・近藤, 1992)と同様の色調を持つ。赤色土壌の形成はボーキサイトの地質時代における産出(岩生, 1977)とともに古気候を示す指標として重要である。しかし、松江市を含む山陰地域が第四紀更新世にこのような古気候を経験したとは考えられず、その成因については興味あるところである。そこで本論ではこの赤色粘土の地球化学的性質を検討した。この粘土層の形成過程を検討することは山陰地域の環境変動を解明する重要な資料となると言える。

地質概要

松江市は第三紀の地層群が広く分布し宍道地溝帯(澤田ほか, 2001 参照)に位置している。第三系は堆積岩と火成岩からなり複雑な地質構造をなしている。これらの地層は中新世

前期から中期にかけて日本海の拡大にともなって陸上及び海底での活発な火成活動と地殻変動をへて形成されたものである。そして中新世後期には松江層に代表されるように比較的安定した堆積盆地(浅海)において堆積物が形成される。この堆積物にはアルカリ玄武岩の陸上噴火が生じて、松江市の北部を中心として広範囲に玄武岩溶岩および火砕岩が分布している(鹿野ほか, 1994)。

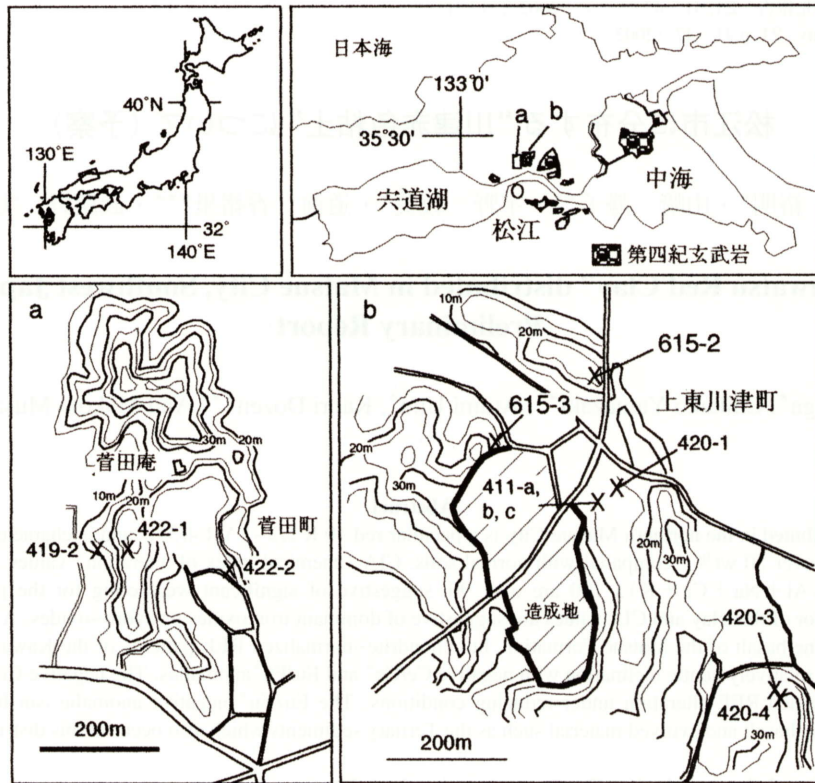
地形的には松江市北部の菅田および川津を中心とする地域は低い丘陵(標高 10 m~30 m)と沖積低地からなる(第 1 図)。川津地域の東には高山(標高 130 m)があり、北部は島根半島の山地(標高 200~300 m)が広がる。松江市周辺ではいくつかの段丘面が区分されている(大西, 1979; 鹿野ほか, 1994)。これによれば段丘層は高位段丘(I, II, III), 中位段丘(I, II), および低位段丘に区分される。高位段丘 II は標高 35~45 m に平坦面をなす。大西(1979)はこの平坦面の地層を乃白層と呼んだ。上部は赤色風化土があり、この層は大山松江軽石層(11~12 万年前)に被われるとされている。また、高位段丘 III は標高 25 m に平坦面をなす。そして、この層は乃木層と呼ばれ、上部は赤色土壌化しているとされ、大山松江軽石層に被われている(大西, 1979)。中位段丘 I は標高 15 m の平坦面をなし、やはり赤色をおびた褐色-黄褐色の土壌を伴うとしている。中位段丘 II は標高 5~10 m の平坦面をなす。松江市北部の川津~菅田地域では標高 45 m の高位段丘 I, 標高 25~35 m の高位段丘 III, および標高 5~10 m の中位段丘 II の平坦面の発達が見られる。

* 島根大学総合理工学部地球資源環境学科
Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

** 島根大学生物資源科学部生環境科学科
Department of Life Environmental Science, Shimane University, Matsue 690-8504, Japan

*** 特殊プラント工業(株)
Tokushu Plant Industry Co. Ltd. Osaka, 558-0015, Japan

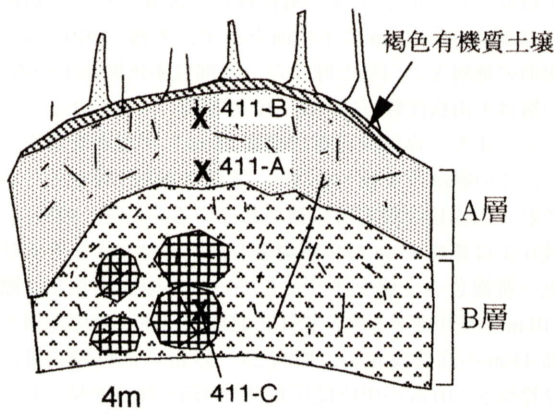
**** 京都教育大学
Kyoto university of Education, Kyoto 612-8500, Japan



第1図 山陰地域の位置および川津赤色粘土の試料の採集位置と標高を示す。



第2図 川津赤色粘土の露出状況の例 (松江市東川津町にて)。



第3図 川津赤色粘土層の露頭スケッチ (松江市上東川津にて)。

試料

検討に用いた試料は菅田および川津地域で採取した(第1図)。菅田地域では菅田町の丘陵において標高25m(422-1)、標高12m(419-2)、標高7m(422-2)を採取した。これらの試料は松江層のアルカリ玄武岩を母材として形成された土壌からなる。川津地域にも同様の赤色土壌(粘土)は分布しており、島根大学の農場や松江東高等学校(第2図)などの丘陵部に特徴的に分布する。今回試料として用いたのは上東川津町の丘陵で地表に赤色土が見られる露頭で、標高32m(試料番号420-3, 420-4)、約25m(615-2, 420-1, 420-2)、約15m(615-3)、約10m(411-A, B, C)より採取した(第1図)。このうち411-A, B, Cは同一露頭で採取した連続した試料である(第3図)。これらの試料の標高25mの高位段丘Ⅲ、標高15mの中位段丘Ⅰなどに対比される試料は更新世の比較的温暖な環境のもとで形成されたと考えられるが年代決定については問題が残されたままである。

採取した試料はマンセル土壌色調表により色調を決定するとともに、色彩度計(色彩計ミノルタCR-200)により色調を測定してL, a, b座標系に示した(第1表)。またマンセル土壌色調表での変換も示した。色調は10R 4/3~0.1YR 5/4(L, a, b座標系ではL=42-55, a=+10-16, b=+9-18)であり、非常に強い赤色を示すものが多い。

第1表 色彩計による色調の測定結果. L, a, b 座標系およびマンセル土壌色彩系により結果を表示する. いずれも極めて赤色の強い色調を持つことがわかる.

Sample no.	L	a	b	Munsell
Kawatsu				
420-3	45.5	13.5	10.8	9.2R 5/3
420-4	54.1	9.5	18.3	5.6YR 5/3
420-1	47.1	10.0	11.8	2.2YR 5/3
420-2	47.4	11.1	11.3	0.9YR 5/3
411-A	43.2	14.1	11.0	9.1R 4/3
411-B	42.8	13.2	10.2	9.0R 4/3
411-C	45.9	13.0	12.5	0.5YR 5/3
Sugata				
422-1	47.8	10.9	10.9	9.9R 5/3
422-2	50.7	11.8	10.9	10.0R 5/3
419-2	42.8	13.2	9.3	8.1R 4/3

第2表 川津赤色粘土層の主元素組成, L.O.I.および CIA 値を示す. 高い Al₂O₃ 値が特徴的であり, CIA は 1 試料を除いて 98 以上で激しい化学的風化作用を被ったことを示す.

Sample no.	Major Oxides (wt%)											LOI	CIA
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅			
615-3	61.94	1.25	24.04	9.00	0.06	1.13	0.28	0.43	1.82	0.05	17.27	88.67	
615-2	45.97	2.45	32.43	16.76	0.09	1.99	0.05	-	0.22	0.06	17.27	99.45	
411-A	46.47	2.49	33.32	15.23	0.05	1.85	0.04	-	0.50	0.04	18.40	98.44	
411-B	45.62	2.69	33.50	16.04	0.04	1.55	0.05	-	0.46	0.05	16.92	98.65	
419-2	45.05	2.94	34.09	16.67	0.05	0.78	0.04	-	0.32	0.08	16.15	99.34	
422-1	46.71	2.77	33.55	15.37	0.04	1.09	0.04	-	0.32	0.10	16.83	99.53	

第3表 川津赤色粘土層の微量元素組成. 比較のために平均頁岩の組成 (PAAS: Post-Archean Australian Shale, Taylor and McLennan, 1985) およびいくつかの元素 (*) については Bowen (1979) の頁岩組成を引用した.

Sample no.	altitude m	Trace elements														
		As	Pb	Zn	Cu	Ni	Cr	V	U	Th	Sc	Sr	Y	Nb	Zr	TS
Kawatsu																
420-3	32	1	8	89	73	204	487	531	1	5	49	20	26	20	194	921
420-4	33	1	5	13	88	311	518	517	1	3	52	13	35	21	193	619
420-1	25	2	9	91	65	226	283	370	1	9	45	164	20	15	149	228
420-2	25	4	1	78	62	141	236	344	1	7	41	198	20	14	143	297
411-A	10	4	9	55	71	121	168	519	1	8	60	26	10	17	182	1216
411-B	10	4	10	53	79	143	143	570	1	9	61	18	8	18	194	1087
411-C	10	3	9	122	69	181	197	402	1	8	48	146	38	19	158	284
615-2	25	3	9	47	79	166	407	531	1	4.9		2	10.4	18.3	179	1246
615-3	15	18	23	78.8	30	69	189	244	3	13		61	21.0	15.9	206	655
Sugata																
422-1	45	4	12	40	38	97	236	579	1	9	41	nd	12	18	250	1401
422-2	7	1	6	93	95	223	423	775	1	6	57	nd	72	20	150	697
419-2	12	4	11	41	56	157	264	537	1	9	52	nd	9	18	269	1688
Shale		13*	20	120*	39*	55	160	150	3.1	14.6	16	200	27	19	210	

赤色粘土の元素組成

採集した試料は 110℃, 24 時間乾燥後, 自動メノウ乳ばちにより粉碎した. そして蛍光 X 線分析装置 (リガク RIX 2000) を用いて, 6 試料については 2:1 ガラスビード法 (Kimura and Yamada, 1996) によって主元素組成を求めた (第 2 表). さらに全ての試料について粉末プレス法 (小笠原, 1987) により微量元素組成 (As, Pb, Cu, Zn, Cr, V, Sr, Zr, Th, Sc, U, [ppm]) および TS (全イオウ [wt%]) を求めた (第 3 表). なお, L.O.

I. 値は 1050℃, 1 時間電気炉により加熱し測定した (第 2 表).

希土類元素およびいくつかの微量元素は放射化分析 (京都大学原子炉研究所の共同利用) により計測した (第 4 表).

なお希土類についての Eu/Eu* 異常, Ce* 異常は次式によって計算した.

$$\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N)^{1/2}; \text{なお } \text{Gd} = (\text{Sm} \times \text{Tb})^{1/3}$$

$$\text{Ce}^* = 5 \text{Ce}_N / (4 \text{La}_N + \text{Sm}_N) \quad (\text{Musashino, 1990})$$

第4表 川津赤色粘土層の希土類元素組成およびコンドライト (Condie., 1993) により規格化した値を示す。この組成をミキシングモデルによって考察するために古江層 (山崎ほか, 1999) および JB 1 (Potte et al., 1992) を混合して検討した結果を示す。

	Observed			Matsue F.			Modelled			
	sample no	615-2	615-3	av.	Furue	JB1	Basalt*	Fu:JB1		
ppm								20:80	40:60	60:40
La		11.4	19.7	15.5	35.57	38	95.4	37.51	37.03	36.54
Ce		15.8	21.4	18.6	75.8	67	231.1	68.76	70.52	72.28
Sm		2.3	3.2	2.7	8.2	5	10.4	5.64	6.28	6.92
Eu		0.5	0.8	0.7	1.55	1.52	2.5	1.53	1.53	1.54
Gd		33.1	11.2	22.2	9.64	4.7	2.0	5.69	6.68	7.66
Tb		0.4	0.5	0.4	1.15	0.76	0.9	0.84	0.92	0.99
Yb		1.8	1.7	1.8	2.93	2.1	1.6	2.27	2.43	2.60
Lu		0.3	0.3	0.3	0.54	0.31	0.3	0.36	0.40	0.45
Chondrite-normalized										
La		31.0	53.6	42.27	96.9	103.5	260.0	102.22	100.89	99.57
Ce		16.5	22.4	19.45	79.2	70.0	241.5	71.85	73.69	75.53
Sm		9.9	13.8	11.87	35.5	21.6	45.2	24.42	27.19	29.96
Eu		5.9	9.8	7.83	17.8	17.5	28.4	17.54	17.61	17.68
Gd		7.8	9.8	8.80	24.1	15.5	21.6	17.21	18.92	20.64
Tb		6.9	8.2	7.58	19.8	13.1	14.9	14.45	15.79	17.14
Yb		7.4	6.8	7.08	11.8	8.5	6.5	9.14	9.81	10.48
Lu		6.9	8.4	7.63	14.2	8.1	7.0	9.34	10.55	11.76
Eu/Eu*		0.67	0.84	0.76	0.61	0.95	0.91	0.89	0.82	0.75
Ce*		0.67	0.55	0.61	1.00	0.92	1.32	0.94	0.95	0.97
LaN/SmN		3.12	3.88	3.50	2.73	4.78	5.76	4.37	3.96	3.55
GdN/YbN		1.06	1.44	1.25	2.04	1.83	3.35	1.87	1.91	1.95
LaN/YbN		4.20	7.89	6.04	8.20	12.23	40.31	11.42	10.62	9.81
Th/Sc		0.86	0.70	0.78	0.91	0.34		0.45	0.56	0.68
ppm										
Sc		15.9	11.8	13.8	12.5	27.4				
Hf		6.4	3.4	4.9						
Ta		1.4	0.8	1.1						
Th		13.7	8.2	10.9	11.3	9.2	19.6			
U		1.6	4.4	3.0						
Cs		9.1	4.5	6.8						

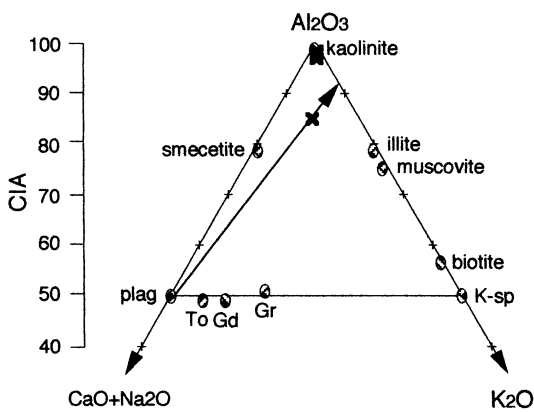
1. 主元素組成

SiO₂ は 615-3 の試料を除いて、45~46 wt% である。TiO₂ は 615-3 は 1.25 wt% と低い但他的試料では 2.5~2.9 wt% と高い。Al₂O₃ は 615-3 は 24.0 wt% で低い但他的 32~34 wt% と極めて高くなってきている。Fe₂O₃* は 615-3 では 9 wt% であるが、その他の試料では 16 wt% 前後の値を示す。松江層の玄武岩は一般には 9.7~16 wt% であり (鹿野ほか, 1994), 鉄の含有量はほとんど変わらない。TiO₂ は 1.5~2.3 wt% で高い。松江層の玄武岩では 0.87~2.0 wt% (平均値 1.46 wt%) でありやや高い。MgO は 1~2 wt% 含まれており玄武岩の組成と比較して大きな変化は無い。CaO, Na₂O および K₂O は 615-3 を除いて低く 1 wt% 以下である。CaO については松江層の玄武岩の値 (CaO=6.1~10 wt%) に比較して著しく低い。Na₂O および K₂O についても同様に極めて低い。このように Al₂O₃ に富んでアルカリ金属、アルカリ土類に乏しい傾向は強い風化作用を受けたためと言える。L.O.I. 値は試料において 16.2~18.4 wt% である。

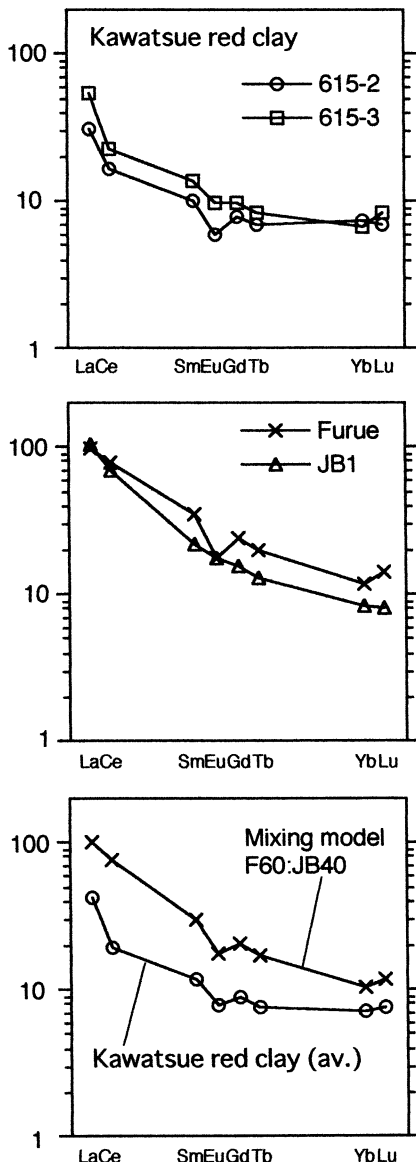
風化の指標を示す CIA = mol Al / (Al + Na + Ca* + K) 値 (Ca* はケイ酸塩鉱物の値, Fedo et al., 1995 参照) を求めると 615-3 は 88.67 であり、その他の試料は 98.7 以上でありである (第 2 表)。また、A-CN-K 判別図では 615-3 以外の試料は A 頂点付近にプロットされる (第 4 図)。このことは長石のほぼ完全な分解と溶解を示唆するものである。

2. 微量元素

微量元素の検討のために頁岩の平均化学組成 PAAS (Post-archean Australian Shale; Taylor and McLennan, 1985) およびいくつかの元素については Bowen (1979) による組成を第 3 表に示した。頁岩 (Shale) に比較して低いものは As, Pb, Zn, U, Sr, Th である。高いものは Cu, Ni, Cr, V, Sc であるがこれらはアルカリ玄武岩がもともと高い含有量を持っていることによるかもしれない。Y, Nb, Zr は変化に富むがほぼ同じ値を持つ。特徴的なことは TS が 1000 ppm をこえる試料があることである。また、411-A, B, C は露頭内での連続した試料



第4図 川津赤色粘土層のA-CN-Kダイアグラム.1試料を除いてA頂点付近にプロットされ強い風化作用を受けたことを示す.



第5図 川津赤色粘土層のコンドライトにより規格化した希土類元素組成のパターン図. 赤色粘土層の組成を古江層の堆積岩組成(山崎ほか, 1999)とJB1のREEパターンをもとに両者の混合によりモデル化したREEパターンを示している.

であるが, 母材に近い試料(411-c; TS=284 ppm)に比較して赤色土壌(411-A, B)ではTS値(それぞれ1087, 1216 ppm)は高くなっている. これは土壌化に伴って濃度が高くなったことを示すのかもしれない.

REEパターンおよびTh/Sc比

希土類元素やTh, Scは酸やアルカリによる溶解度が他の元素に比べて低く, 水中での滞留時間が短いので堆積を供給した後背地の組成を推定するのに有効である(Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1993). また, 堆積物とは後背地に存在する様々な物質の混合によって形成されるものであるので, このような組成を異にする物質のミキシングモデルをもちいて堆積物の組成を評価することが可能である(Fedo et al., 1996; Hassan et al., 1999; 山崎ほか, 1999, 2000など).

第5図にコンドライトにより規格化した赤色粘土のREEパターンを示した. 両者は軽希土類(La, Ce)から重希土類(Yb, Lu)までの傾きは緩やか($La_N/Yb_N=4.2, 7.9$)で, CeとEuは他の希土類元素に比べて負の異常が認められる. 615-2と615-3の両試料を比較すると多少パターンは異なる. 615-2の方が傾きは緩やかで, Eu/Eu^* 負異常は大きい(第4表). しかし全体的な傾向は同じであるので両者の平均値を求め, この堆積物の起源となった物質について考察する. まず, 緩やかなREEパターンについてであるが, 玄武岩では一般にこのような緩やかなパターンを持つ. しかし, 松江層の玄武岩は前述のようにアルカリ玄武岩でありきわめて軽希土類に富んだパターンを持つ(Miyake, 1994, 第4表). REEに加えてTh/Sc比も検討するため, 代表的な試料としてJB1の組成(Potts et al., 1992)を用いる. JB1のREEパターンは傾斜が急であり($La_N/Yb_N=12.2$)赤色粘土のそれ(6.0)とは異なる. また, Eu/Eu^* 負異常は無い($Eu/Eu^*=0.95$). 従って赤色粘土が土壌化によってアルカリ玄武岩のみから形成されたとは考えられない. そこで Eu/Eu^* 負異常についてはアルカリ玄武岩に発達した組成の物質の寄与があると考えられる. 宍道地溝帯に広く分布する古江層は広い後背地を持って上部大陸地殻の平均化学組成に類似する(山崎ほか, 2000). そこでこの組成を用いてミキシングを行う. 古江層は $La_N/Yb_N=8.2, Eu/Eu^*=0.61, Th/Sc=0.91$ の値を持つ. La_N/Yb_N は赤色粘土の平均値よりも高くなっているが, 古江層(Fu)とJB1のミキシングモデルを考えると(第4表), $Fu:JB1=60:40$ において $Eu/Eu^*=0.75, Th/Sc=0.68$ となる. この値は Eu/Eu^* 負異常についてはほぼ同じ数値と成り, Th/Sc値も類似する. しかし, REEパターンの傾斜はこのモデル($La_N/Yb_N=9.8$)においても高い. REEパターンはCIAが80以上においては重希土類が他の希土類に比較してやや高くなる傾向があることが示されているが(Price et al., 1991), Eu/Eu^* 負異常は生じない. そしてCIAが90をこえるとREE含有率は低下することが示されている.

Ce^+ 負異常はCeが+3以外に+4の価数を持つことにより酸化物にもなって付加されることが知られている(Price et

al., 1991; Elderfield et al., 1990). 従って堆積物が形成された後に還元的な環境が支配的であると Ce の溶出が生じることによって負異常が形成される可能性はある (Liu et al., 1988; Price et al., 1991). 二次的な変化による TS 濃度の付加があることを考慮すれば, 初生的な赤色粘土 (おそらくこの段階では赤鉄鉱が卓越していた) が還元作用を受けて変質した可能性がある。

溶出試験

溶出試験は酸・アルカリにより溶出する元素を分析する。Fe, As, Ca の溶出量を測定した。溶出には試料乾土 10 g 当たり 1 N, HCl を 50 mL, 0.5 N, NaOH を 50 mL をそれぞれ加え, 振とう器により 30 分間振とうさせた。振とうさせた試料は遠心分離器で分離を行い, フレームレス原子吸光分光分析 (島津 AAS 60) を用いて濃度の測定を行った。結果を第 5 表に示した。

試料として用いたのは 422-1, 411-b である。HCl による溶出では Fe (151, 159 ppm), As (0.14, 0.18 ppm), Ca (3.2, 5.4 ppm) であり, NaOH ではそれぞれ Fe (1.5, 1.4 ppm), As (0.56, 0.63 ppm), Ca (1.83, 3.13 ppm) である。Fe については HCl により約 100 倍の濃度の溶出が生じている。逆に As は NaOH による方が 4 倍程度高い。このことは Fe は酸性で分解される無機物として存在する濃度が高いことを示し, As は酸性で分解される無機物よりもアルカリによって分解される物質, おそらく多くは有機物に吸着されているものの濃度が高いことを示唆する。Ca については酸性でやや高いが, 酸・アルカリによる分解では明瞭な差異を示しているとは言えない。川津赤色粘土は酸化鉄, 酸化アルミニウムを含み酸化剤, 吸着剤としての応用が考えられる。これについては今御検討していきたい。

土壌形成の地質学

土壌の形成については母材生成説と土壌堆積生成説があり両者の間で議論がなされて来た。山野井 (1996) は黒土の成因について研究し, 土壌堆積生成説の立場から黒ボクの形成過程を解明した。今回検討した赤色粘土 (赤色土壌) は明らかに松江層のアルカリ玄武岩を母材としているものの希土類元素組成と Th/Sc 比からは, 母材のみによって形成された土壌とは考えがたく, 後背地からの物質の混合を示唆する。母材の風化, 侵食, 堆積物の混合といった作用の総和のもとで川津赤色粘土は形成されたといえる。しかも, ミキシングモデルからは古江層に代表されるような発達した組成の物質の関与が松江層の玄武岩との比率で 60 : 40 と高い値を示していることにも留意すべきである。赤色土壌とは極めて緩やかな (もしくはほとんど進行しない) 母材の削剥のもとで風化作用が進行するものの, 風化作用を進行させる降雨や表流水による物質の付加は進行していることとなる (Nesbitt et al., 1996)。CIA 値で示される化学的な風化作用は物質の侵食と化学的な変化の総和である。ミキシングモデルで用いた古江

第 5 表 川津赤色粘土層の酸アルカリによる Fe, As, Ca の溶出試験の結果。

sample no.	HCl 1N			NaOH 0.5N		
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
422-1	151	0.14	3.2	1.5	0.56	1.83
411-b	159	0.18	5.4	1.4	0.63	3.13

層堆積物の CIA 値は 80 前後であり, 島根半島の堆積物の中では最も高い値をもつ (山崎ほか, 1999)。これらが地表での化学的風化作用を受けるとともに玄武岩を母材とする土壌と混合することにより赤色粘土層は形成されたと考えられる。いずれにしても大山松江軽石層の堆積以前にはこのような化学的な風化が進行する環境が存在したことは明らかである。その詳細な年代を決定することが今後の課題である。

謝 辞

川津赤色粘土層については島根大学生物資源科学部若月利之先生, 増永二之先生に貴重な情報と御意見をいただいた。振とう器の使用に際しては生物資源科学部の山本広基先生に便宜をはかっていただくとともに日頃より研究について激励いただいている。放射化分析は京都大学原子炉実験場の共同研究により, 高田実弥先生にはお世話になった。また, 蛍光 X 線分析については澤田順弘先生に機器の使用を許可いただいた。色彩計は横田修一郎先生に, 原子吸光分光分析は同じく三瓶良和先生にご教示いただいた。記して感謝致します。

文 献

- Bowen, H. J. M., 1979, *Environmental Chemistry of Elements*. Academic Press Inc. London, 360 pp.
- Elderfield, H., Upstill-Goddard, R. and Scholkovitz, E. R., 1990, The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters. *Geoch. Cosmoch. Acta*, 54, 971-991.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W. and Young G.N., 1995, Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, 23, 921-24.
- Fedo, C.M., Eriksson, K.A. and Krogstad, E.J., 1996, Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source area weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1751-1763.
- Hassan, S., Ishiga, H., Roser, B. P., Dozen, K., and Naka, T., 1999, Geochemistry of Permian-Triassic shales in the Salt Range, Pakistan: implications for provenance and tectonism at the Gondwana. *Chemical Geology*, 158, 293-314, Elsevier.
- 岩生周一, 1977, ラテライト・ボーキサイトに関連するいくつかの地学的問題, *地学雑誌*, 86, 213-228.
- 鹿野和彦・山内靖喜・高安克己・松浦浩久・豊 遥秋, 1994, 松江地域の地質。地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 126 p.
- Kimura, J. and Yamada Y., 1996, Evaluation of major and trace element XRF analyses using a flux to sample ratio of two to one glass beads. *J. Min. Petr. Econ. Geol.*, 91, 62-72.
- Liu, Y.-G., Miah, M. R. U. and Schmitt, R. A., 1988, Cerium: A chemical

- tracer for paleo-oceanic redox conditions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 1361-1371.
- 松井 健・近藤鳴雄, 1992, 土の地理学—世界の土・日本の土—. 朝倉書店, 122.
- McLennan S., Hemming S., MacDaniel D.K. and Hanson G.N., 1993, Geochemical approach to sedimentation, provenance and tectonics. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 284, 21-40.
- Miyake, Y., 1994, Geochemistry of igneous rocks of Shimane Peninsula, formed within a Miocene back-arc rifting zone at the Japan Sea margin. *Geochem. Jour.*, **28**, 451-472.
- Musashino, M., 1990, The Panthalassa- a cerium-rich Atlantic-type ocean : sedimentary environments of the Tamba Group, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **181**: 165-177.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., McLennan, S. M. and Keats, R. R., 1996, Effects of chemical weathering and sorting on the perogenesis of siliclastic sediments for provenance study. *Jour. Geol.*, **104**, 525-542.
- 小笠原正継, 1987, Rh 管球を用いたけい光 X 線分析による岩石中の微量元素成分の定量. *地質調査所月報*, **38**, 57-68.
- 大西郁夫, 1979, 出雲海岸平野の第四系. *島根大学理学部紀要*, **13**, 131-144.
- Potts, P.J., Tindle, A. G. and Webb, P. C., 1992. *Geochemical reference material compositions*. Caithness, Whittles Publishing, 313 pp.
- Price, R. C., Gray, C. M., Wilson, R. E., Frey, F. A. and Taylor, S. R., 1991, The effects of weathering on rare-earth element, Y and Ba abundances in Tertiary basalts from southeastern Australia. *Chem. Geol.*, **93**, 245-265.
- 沢田 順弘・徳岡 隆夫・山内 靖喜・三瓶 良和・西村 清和, 2001, 宍道地溝帯中軸部, 美保湾で発見された更新世火山とその地質学的意義. *地質雑*, **107**, 392-405.
- Taylor S. R. and McLennan S. M., 1985. *The Continental Crust: its composition and evolution*. Blackwell, Oxford, pp. 312
- 山野井徹, 1996, 黒土の成因に関する地質学的検討. *地質雑*, **102**, 526-544.
- 山崎静子・道前香緒里・石賀裕明, 1999, 台湾および日本列島の古第三系および新第三系の堆積岩の Th, Sc および希土類元素組成. *島根大学地球資源環境学研究報告*, **18**, 55-67.
- 山崎静子・道前香緒里・石賀裕明, 2000, 日本海東縁の諸地域における, 古第三系および新第三系の堆積岩の希土類元素組成, *地質学論集*, **57**, 145-154.

(受付: 2002 年 10 月 1 日, 受理: 2002 年 10 月 28 日)