

## 関東平野北東部における第四紀後期テフラの 主成分及び微量成分組成

金井 豊\* 坂本 亨\*\* 安藤 厚\*

KANAI, Y., SAKAMOTO, T. and ANDO, A. (1988) Chemical composition of the late Quaternary tephra in the northeastern Kanto district. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 39 (12), p. 783-797.

**Abstract :** The late Quaternary tephra covering the northeastern Kanto district were analyzed for major and minor elements (copper, lead, zinc, chromium, nickel, cobalt, lithium, uranium, total carbon, total sulfur), and the chemical compositions of Shichihonzakura Pumice Bed, Imaichi Pumice Bed, Kanuma Pumice Bed and other tephra layers were clarified. These data are thought to be "background concentration" which suffered no artificial pollution.

One of the chemical characteristics of these tephra is that they contain much amount of ignition loss ranging from 5 to 26%. Excluding the ignition loss, Shichihonzakura Pumice Bed is andesitic composition and rich in  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  and  $\text{Na}_2\text{O}$ . Imaichi Pumice Bed is extremely rich in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (more than 30%) and also rich in  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Kanuma Pumice Bed is rich in  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}$  while is poor in  $\text{FeO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Co}$  and  $\text{Zn}$ . Other tephra layers are rich in  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Cu}$  and  $\text{Li}$ , although they are poor in  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$ .

The relationships between the chemical composition of the pumice beds and that of the volcanic rocks which were deposited near the source volcano, are studied. Comparing to the volcanic rocks, the pumice samples were proved to be poor in  $\text{SiO}_2$ , alkali metal and alkaline-earth metal elements, and rich in  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cr}$  (especially in case of Shichihonzakura Pumice Bed),  $\text{Co}$  and  $\text{Pb}$ . The weathering and elution of elements caused by rain or groundwater, are thought to be one of the main factors that control the change of chemical compositions.

### 1. 緒 言

関東平野に広く分布する「関東ローム層」については、その層序や性状に関して、関東ローム研究グループ等によって精力的に研究がなされている。しかし、「関東ローム層」の化学組成に関しては、MORIMOTO *et al.* (1957) や斎藤ほか(1982)が主成分濃度を、また新井ほか(1982)や斎藤(1984)が微量成分濃度を報告しているに過ぎない。新井ほか(1982)は、群馬県皆沢におけるローム層の 26 試料中の水銀濃度を測定し、火山灰土壌中の初生的な水銀量を知らうとした。また、斎藤(1984)は、群馬県・長野県・栃木県に堆積した浅間山、赤城山、榛名山、男体山を起源とするテフラ 35 試料を採取し、カドミウム・銅・鉛・ニッケル・亜鉛濃度を測定し、給源別、層準別に濃度を検討している。しかし、関東平野北東部に

おけるテフラの化学組成については、未だ明らかにされていない。

著者等は、当地域における元素の地球化学的バックグラウンド濃度とでもいうべき自然の元素存在量を明らかにする研究の一環として、関東平野北東部におけるテフラ各層から 63 試料を採取した。本論文は、関東平野北東部のテフラの主成分組成 (15 試料) 及び銅・鉛・亜鉛・クロム・ニッケル・コバルト・リチウム・ウラン・全硫黄・全炭素の濃度 (全試料) を明らかにするものである。さらに、これらの化学組成を、それと対応する給源火山近くの噴出物の化学組成と比較検討している。

### 2. 試料採取地域におけるテフラのあらまし

関東平野北東部の第四紀後期テフラ層の層序は、宇都宮地域を標準として立てられている (阿久津, 1960; 関東ローム研究グループ, 1965 など)。ここでは、層序関係・岩相・鍵層・重鉱物組成などをもとに、上位から田原ロ-

\* 地殻化学部

\*\* 元 地質部 (現 名古屋大学)

第1表 関東平野北東部におけるテフラ層の層序の比較

宇都宮地域		本研究地域
田原 ローム層	七本桜軽石層……………	七本桜軽石層
	今市軽石層……………	今市軽石層(1.2万-1.3万年前)
宝木 ローム層	火山灰	} 上部ローム層
	鹿沼軽石層……………	
	火山灰(楡木軽石層を挟む)	
宝積寺 ローム層	火山灰	} 下部ローム層
	満美穴スコリア層	
戸祭 ローム層	火山灰(真岡軽石層を挟む)	(東京軽石層, 4.9万年前)
	火山灰	

ム層・宝木ローム層・宝積寺ローム層・戸祭ローム層が区分されている。しかし、給源火山から遠ざかり、テフラ層が全体として薄くなっている茨城県中部地域では、鍵層や黒色バンドの発達が悪く、この層序区分を充分適用できるまでに至っていない。茨城県中部地域に全域的に広く分布している最も有効な鍵層は鹿沼軽石層であり、また、その北半部では七本桜軽石層・今市軽石層も断続的ながら認められる。今回扱った試料は、一部には栃木県下のもも含まれているが、大部分は茨城県中部の那珂台地・東茨城台地から採取したものである。そのため、採取地域全体に通じるテフラ層の層序区分としては、最上位の七本桜・今市軽石層を除いて、鹿沼軽石層より上位(上部ローム層)と下位(下部ローム層)とに区分するととどめた。本論文で使用した層序区分と宇都宮地域の標準層序区分との対応は、第1表に示した。

那珂台地・東茨城台地に発達するテフラ層の性状については、各地域毎に五万分の1地質図幅 地域地質研究報告「那珂湊」(坂本ほか, 1972), 「磯浜」(坂本, 1975), 「石岡」(坂本ほか, 1981)に記述されている。これら全体を通じてみると、台地表面を広く覆うテフラ層は全体として3m内外の厚さで、上位から以下に述べるような特徴を示す。

七本桜軽石層・今市軽石層は、調査範囲の北部でテフラ層の最上部、黒土の直下に断続的にみられるもので、層厚は両者とも最厚で15cm程度、前者は黄色の、後者は赤褐色の軽石粒からなる。重鉱物としては、両者とも紫蘇輝石・普通輝石・磁鉄鉱を主とし、角閃石を伴う。ともに日光の男体火山の噴出物で、今市軽石層の形成年代は1.2-1.3万年前である(年代値は、町田ほか(1984)による。以下同じ。)

上部ローム層は、層厚1-1.5mで、明褐色を呈し、均質・塊状である。ただし、この下半部では幾分粘土化が進み、暗色がかってくる。重鉱物組成は、上半部で紫蘇

輝石・普通輝石・磁鉄鉱を主とし、角閃石・かんらん石をわずかに含む。下半部では、紫蘇輝石・角閃石・磁鉄鉱を主とし、普通輝石・かんらん石を伴う。この上半部が宇都宮地域の田原ローム層に、下半部が同じく宝木ローム層の上半部に相当する。

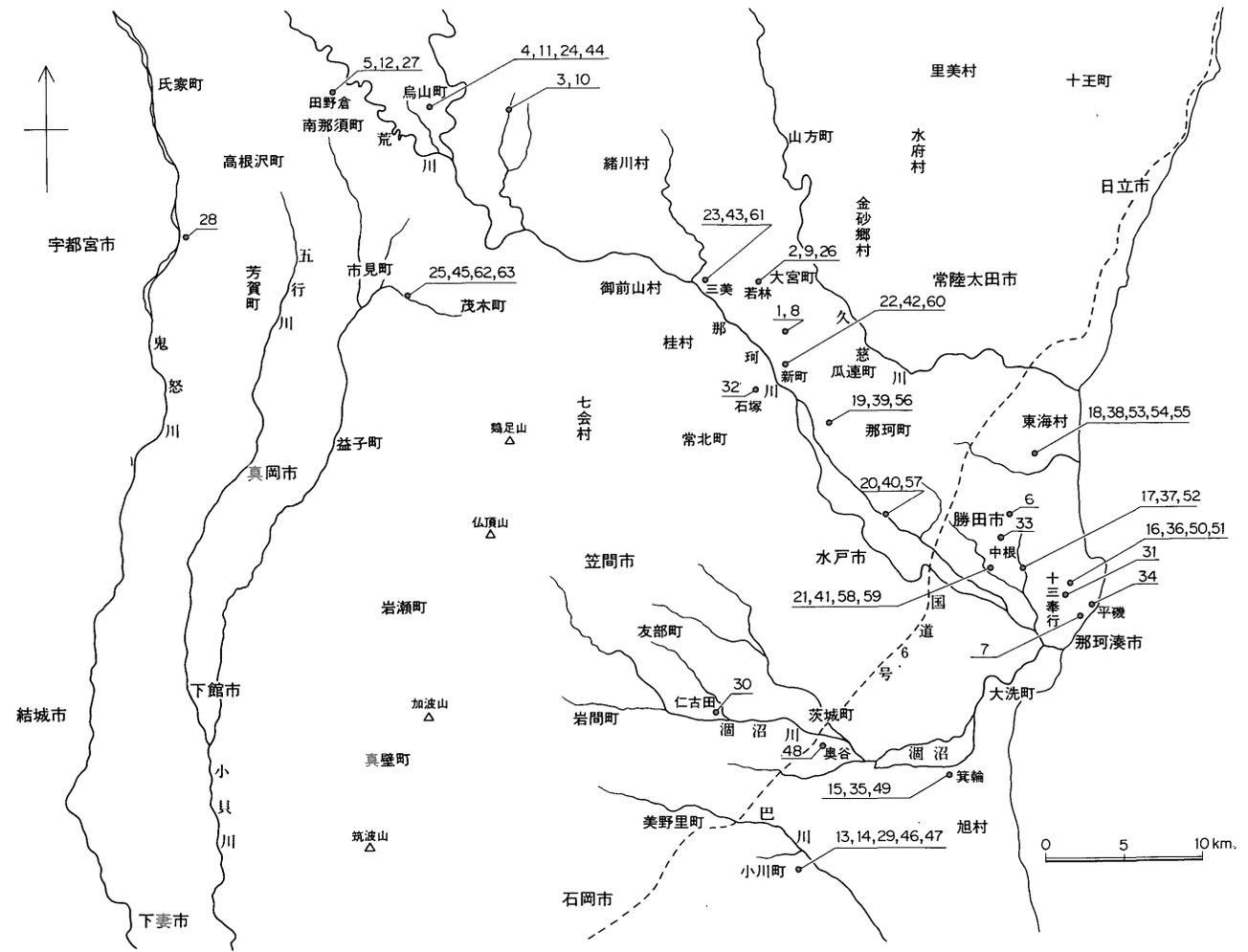
鹿沼軽石層は、1-2mm大の黄白色軽石粒からなり、層厚は70cm強から20cm弱まで規則的に変化する。重鉱物としては、紫蘇輝石・角閃石・磁鉄鉱を主とし、普通輝石は少ない。この軽石層は、赤城火山の中央火口丘活動期に噴出した降下軽石層で、その年代は3.1-3.2万年前である。

下部ローム層は、幾分暗色がかった褐色を呈し、無層理・塊状で、時に砂混じりとなっている。上部に比べて粘土化が進んでおり、幾分締まった感じを与える。重鉱物組成としては、紫蘇輝石・角閃石・磁鉄鉱を主とし、少量の普通輝石・かんらん石を伴う。この部分は、宝木ローム層の下半部以下に相当する。東茨城台地南部では、下部ローム層の下限近くに、東京軽石層の末端部を痕跡的に挟んでいる。東京軽石層は、箱根火山の約4.9万年前の噴火の産物とされているので、台地地域では、下部ローム層の下限は少なくともほぼ5万年前と見られる。

### 3. 試料及び分析方法

#### 3.1 分析試料

分析に供した試料は、茨城・栃木県下で七本桜軽石層・今市軽石層・上部ローム層・鹿沼軽石層・下部ローム層から採取したものである。試料採取地点を第1図に示した。試料数は、七本桜軽石層5試料、今市軽石層7試料、上部ローム層15試料、鹿沼軽石層18試料、下部ローム層18試料、合計63試料である。これらの各試料は約1kg採取し、室温で風乾後四分法を用いて約50gとし、そのままのう乳鉢で微粉砕して分析に供した。



第1図 試料採取地点

第2表 テフラ層の主成分化学組成(単位は%)

No.	七本桜軽石層				今市軽石層				上部ローム層				鹿沼軽石層				下部ローム層							
	1	3	5	ave.	9	11	6	ave.	17	21	13	ave.	37	39	31	ave.	52	58	46	ave.				
SiO <sub>2</sub>	50.64	52.71	53.31	52.22	32.32	35.64	30.52	32.83	37.84	38.45	35.43	37.24	38.36	42.15	39.81	40.11	42.40	43.36	42.88	42.88				
TiO <sub>2</sub>	0.90	0.69	0.78	0.79	1.18	0.81	0.77	0.92	0.97	0.73	0.98	0.89	0.38	0.30	0.31	0.33	1.09	0.78	0.86	0.91				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.10	17.94	17.36	17.80	24.78	22.49	21.78	23.02	22.63	22.41	25.34	23.46	29.09	27.93	27.50	28.17	21.47	22.51	22.79	22.26				
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.86	3.50	4.38	3.91	7.67	7.75	12.29	9.24	8.15	7.94	10.57	8.89	2.34	2.54	2.25	2.38	8.76	8.07	9.22	8.68				
FeO	6.19	5.66	4.85	5.57	2.32	2.67	2.17	2.39	0.68	0.86	1.02	0.85	0.56	0.86	0.53	0.65	1.00	1.35	0.80	1.05				
MnO	0.23	0.21	0.22	0.22	0.26	0.24	0.18	0.23	0.17	0.17	0.17	0.17	0.08	0.08	0.09	0.08	0.15	0.08	0.17	0.13				
MgO	4.97	4.27	4.11	4.45	1.06	2.54	1.48	1.69	1.33	1.27	1.45	1.35	0.51	0.67	0.52	0.57	1.50	1.24	1.09	1.28				
CaO	5.98	5.71	5.51	5.73	1.29	2.10	1.73	1.71	0.54	0.34	0.36	0.41	3.58	3.39	2.55	3.17	0.47	0.58	0.40	0.48				
Na <sub>2</sub> O	2.32	2.44	2.31	2.36	0.39	0.84	0.92	0.72	0.63	0.78	0.68	1.46	1.67	1.34	1.49	0.70	0.61	0.60	0.64					
K <sub>2</sub> O	0.47	0.81	0.86	0.71	0.26	0.31	0.36	0.31	0.82	0.97	1.04	0.94	0.31	0.40	0.42	0.38	0.98	0.78	0.92	0.89				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.13	0.15	0.13	0.25	0.14	0.10	0.16	0.11	0.10	0.06	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.15	0.14	0.08	0.12				
Ig. L.*	5.35	5.02	5.28	5.22	28.64	24.21	26.93	26.59	25.45	25.34	22.36	24.38	22.25	19.45	24.03	21.91	20.96	20.15	19.73	20.28				
Total	99.13	99.09	99.12	99.11	100.33	99.74	99.23	99.81	99.32	99.21	99.56	99.35	99.02	99.53	99.43	99.33	99.63	99.65	99.54	99.60				
SiO <sub>2</sub>					55.51				44.84				49.67				51.82				50.54			
TiO <sub>2</sub>					0.84				1.26				1.19				0.43				1.24			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					18.92				31.44				31.29				36.40				30.21			
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					4.16				12.62				11.86				3.05				11.78			
** FeO					5.92				3.26				1.13				0.84				1.43			
MnO					0.23				0.31				0.23				0.10				0.18			
MgO					4.73				2.31				1.80				0.74				1.74			
CaO					6.09				2.34				0.55				4.10				0.65			
Na <sub>2</sub> O					2.51				0.98				0.91				1.93				0.87			
K <sub>2</sub> O					0.75				0.42				1.25				0.49				1.21			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>					0.33				0.22				0.12				0.12				0.16			
Total					99.99				100.00				100.00				100.02				100.01			

\* Ig. L. は 1000°Cにおける強熱減量を FeO の酸化を考慮して補正した減量

\*\* 再計算値は Ig.L. を除いた成分間の組成

### 3.2 分析方法

#### (1) 主成分

主成分は、大森(1978)、寺島(1979)の方法に従って定量を行った。

#### (2) 銅・鉛・亜鉛・クロム・ニッケル・コバルト・リチウム

試料 0.5 g を白金皿に正しく秤り取り、硝酸 5 ml、過塩素酸 5 ml、フッ化水素酸 10 ml を加えて砂浴上で分解、蒸発乾固した後、塩酸(1+1) 2.5 ml を加えて穏やかに暖めて溶かし、25 ml 定容とした。アルミニウム 1600 ppm、鉄 1000 ppm、カルシウム 600 ppm、マグネシウム・ナトリウム・カリウムそれぞれ 400 ppm をマトリックスとして加えた銅・鉛・亜鉛・クロム・ニッケル・コバルト・リチウムの標準濃度系列を用い、原子吸光分析法によって定量を行った。測定装置には、Japan Jarrel Ash 社製 AA8500 を用い、亜鉛・コバルトの定量においては、重水素ランプによるバックグラウンド補正を行った。本法によって、同一試料を 7 回繰り返して測定した場合の相対変動係数は、銅 1%、鉛 3%、亜鉛 2%、クロム 9%、ニッケル 8%、コバルト 2%、リチウム 1% であった。

#### (3) 全炭素・全硫黄

寺島(1979)の方法に従い、高周波燃焼・赤外吸収法

を用いて定量した。装置には、国際電気(株)アイアールマチック“C-S”VK-III AS型を使用し、試料 0.1 g をタングステンと鉄粉を助燃剤に用いて分析した。

#### (4) ウラン

ウランは、望月・大場(1970)に従い、陰イオン交換-蛍光法によって定量を行った。蛍光の測定には、Aloka 社製 Fluorimeter FMT-4B を使用した。

そのほか、分析に用いた試薬類は、すべて市販されている特級試薬を使用した。

## 4. 結果と考察

### 4.1 テフラの主成分化学組成

主成分の分析は、七本桜軽石層、今市軽石層、上部ローム層、鹿沼軽石層及び下部ローム層の各々について 3 試料、合計 15 試料について行った。分析結果とそれぞれの平均値及び平均値から強熱減量(1000°Cにおける強熱減量を FeO の酸化を考慮して補正した値)を差し引いた再計算値を第 2 表に示した。当地域に分布する降下軽石層やローム層の主成分化学組成についての報告はないが、今回得られたこれらの堆積物の化学組成は、人為的汚染の少ない、自然のままの化学組成と考えられる。

強熱減量は、七本桜軽石層で約 5% であるが、他のテ

第3表 男体火山・赤城火山噴出物の化学組成 (単位は%)

	男体火山軽石*			男体火山スコリア**	赤城火山 見晴山熔岩***
	MY4911014	MY5608163	ave.	MY4805064	
SiO <sub>2</sub>	62.09	63.63	62.86	64.43	70.88
TiO <sub>2</sub>	0.33	0.39	0.36	0.84	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.66	16.12	15.39	15.14	16.84
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.24	3.40	2.32	2.88	0.28
FeO	3.90	2.30	3.10	3.42	1.69
t. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			5.76	6.68	2.16
MnO	0.10	0.12	0.11	0.11	0.04
MgO	2.54	2.30	2.42	1.98	0.80
CaO	6.66	4.96	5.82	5.26	3.71
Na <sub>2</sub> O	2.98	2.80	2.89	4.29	2.93
K <sub>2</sub> O	1.77	1.96	1.87	1.58	2.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.13	0.13	0.50	0.13
H <sub>2</sub> O(+)	3.12	1.70	2.41	0.15	0.46
H <sub>2</sub> O(-)	0.50	0.27	0.38	—	0.06
Total	100.02	100.08	100.06	100.58	100.03
****					
再計算値					
SiO <sub>2</sub>			64.62	64.15	71.23
TiO <sub>2</sub>			0.37	0.84	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			15.82	15.08	16.92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			2.38	2.82	0.28
FeO			3.19	3.40	1.70
MnO			0.11	0.11	0.04
MgO			2.49	1.97	0.80
CaO			5.98	5.24	3.73
Na <sub>2</sub> O			2.97	4.27	2.94
K <sub>2</sub> O			1.92	1.57	2.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			0.13	0.50	0.13
Total			99.98	100.00	99.99

\* 緑褐色角閃石含有普通輝石紫蘇輝石石英安山岩質軽石 (山崎, 1957)

\*\* 無斑晶ガラス質安山岩質 welded scoria (山崎, 1957)

\*\*\* 紫蘇輝石角閃石石英安山岩 (太田, 1952)

\*\*\*\* 再計算値は H<sub>2</sub>O (土)を除いた成分間の組成

テフラ層では20%を越える。第2表下段の強熱減量を差し引いた再計算値でみると、SiO<sub>2</sub>は七本桜軽石層で55.5%と安山岩質であるが、その他のテフラ層は44.8-51.8%とSiO<sub>2</sub>に乏しい玄武岩質な値を示している。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>は、七本桜軽石層では18.9%であるが、その他のテフラ層では30.2-36.4%と異常に高い値を示している。全鉄は、七本桜軽石層を除くと鹿沼軽石層では約4%とSiO<sub>2</sub>に乏しい玄武岩質岩としては異常に少ないのに対し、その他は10%を越えている。FeO/全鉄の比は七本桜軽石層を除くと小さく、鉄の大部分はFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>である。同様に、MgOとCaOもそれぞれSiO<sub>2</sub>の乏しい玄武岩質岩の値としては極端に低い値を示している。Na<sub>2</sub>Oは、七本桜軽石層で2.5%であるが、今市軽石層・上部ローム層・下部ローム層では約1%であり、鹿沼軽

石層でも2%を越えない。K<sub>2</sub>Oは、0.4-1.2%で軽石層よりも上部・下部ローム層が高い値を示している。

#### 4.2 同じ噴火サイクルの噴出物の主成分化学組成との比較

七本桜軽石層と今市軽石層は、男体火山を給源火山とする降下火砕堆積物である。鹿沼軽石層は、赤城火山を給源火山とする。

男体火山の活動は、休止期をはさんで主活動期と末期の二つの活動期に分けられる(山崎, 1957)。末期の活動は、多量の火砕物の噴出で始まり、まず第1回の噴火で今市降下スコリア堆積層とスコリア流堆積物を噴出し、第2回の活動で七本桜降下軽石層、竜頭滝軽石流及び荒沢軽石流を噴出した。今市軽石層は今市降下スコリア堆積層と、七本桜軽石層は七本桜降下軽石層と、それぞれ

第4表 テラフ層の微量元素化学成分組成

No.	地層名	採取地点	Li (ppm)	Cr (ppm)	Co (ppm)	Ni (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)	U (ppm)	C (%)	S (%)
1	七本桜軽石	那珂郡大宮町滝沢	8	27	29	22	11	112	17	1.2	0.24	0.04
2	〃	〃 〃 若林	8	25	26	18	11	101	17	0.9	0.11	0.01
3	〃	那須郡烏山町三斗蒔	12	25	28	21	14	108	18	1.5	0.17	0.01
4	〃	〃 〃 南	10	25	27	18	12	102	19	1.4	0.35	0.03
5	〃	〃 南那須町田野倉	12	26	27	20	15	104	19	1.1	0.17	0.02
6	今市軽石	勝田市西原	5	19	21	15	18	54	17	1.5	1.44	0.13
7	〃	那珂湊市平磯	22	28	22	25	39	78	17	—	1.49	0.15
8	〃	那珂郡大宮町滝沢	6	9	23	22	31	73	27	1.9	0.90	0.01
9	〃	〃 〃 若林	11	9	25	25	38	137	27	2.4	0.64	0.02
10	〃	那須郡烏山町三斗蒔	10	7	26	21	40	97	29	2.1	0.57	0.02
11	〃	〃 〃 南	9	17	29	25	25	90	32	1.3	1.31	0.02
12	〃	〃 南那須町田野倉	7	21	25	25	40	123	22	2.1	0.60	0.02
13	上部ローム	小川町南原	40	78	36	61	124	103	27	2.2	0.96	0.13
14	〃	〃 〃	32	50	34	50	114	108	22	—	0.56	0.13
15	〃	鹿島郡旭村箕輪	40	64	33	48	107	116	31	2.0	0.95	0.15
16	〃	那珂湊市平磯町	20	43	23	25	49	89	14	—	0.23	0.01
17	〃	勝田市中根	33	52	27	37	92	101	27	2.0	0.94	0.19
18	〃	那珂郡東海村押延	34	54	29	39	90	94	29	—	0.50	0.06
19	〃	〃 那珂町立石	37	55	27	41	88	102	30	2.3	1.02	0.03
20	〃	〃 〃 東木倉	29	45	24	32	64	98	25	—	1.05	0.10
21	〃	勝田市中根	41	58	28	40	93	102	28	2.6	0.88	0.09
22	〃	那珂郡大宮町新町	41	61	28	39	95	100	32	—	0.77	0.08
23	〃	〃 〃 三美	39	66	28	38	77	116	31	2.2	1.08	0.08
24	〃	那須郡烏山町南	41	52	25	41	76	79	32	—	0.42	0.03
25	〃	芳賀郡市貝町平	32	47	18	37	65	83	21	1.3	0.86	0.06
26	〃	那珂郡大宮町若林	56	46	16	36	52	102	22	—	0.37	0.03
27	〃	那須郡南那須町田野倉	28	43	22	38	51	110	23	—	0.22	0.03
28	鹿沼軽石	宮都宮市満美穴	12	1	5	15	10	18	19	—	0.15	0.01
29	〃	小川町南原	10	16	12	29	17	34	22	—	0.87	0.08
30	〃	友部町仁古田	9	2	4	19	12	24	23	—	0.30	0.03
31	〃	那珂湊市十三奉行	15	8	8	19	13	31	20	1.3	0.38	0.04
32	〃	常北町石塚	9	1	4	15	14	23	29	—	0.24	0.01
33	〃	勝田市中根	25	13	9	26	27	62	20	—	0.66	0.03
34	〃	那珂湊市平磯町	13	15	9	22	18	37	18	—	0.71	0.09
35	〃	鹿島郡旭村箕輪	9	12	13	27	14	39	30	1.4	0.52	0.04
36	〃	那珂湊市平磯町	10	10	12	24	11	34	23	—	0.24	0.02
37	〃	勝田市中根	8	10	12	21	8	30	27	1.3	0.43	0.06
38	〃	那珂郡東海村押延	11	11	11	25	17	41	26	—	0.50	0.03
39	〃	〃 那珂町立石	11	10	11	25	11	66	23	1.3	0.34	0.02
40	〃	〃 〃 東木倉	10	11	13	20	17	51	24	—	0.42	0.04
41	〃	勝田市中根	9	12	11	26	13	31	25	1.3	0.64	0.05
42	〃	那珂郡大宮町新町	11	8	10	23	8	30	23	—	0.21	0.03
43	〃	〃 〃 三美	13	8	9	19	9	27	22	1.0	0.29	0.05
44	〃	那須郡烏山町南	15	9	11	21	8	48	23	—	0.11	0.01
45	〃	芳賀郡市貝町平	12	9	12	22	9	46	22	—	0.21	0.03
46	下部ローム	小川町南原	34	42	30	35	92	99	20	1.4	0.61	0.05
47	〃	〃 〃	25	36	27	30	65	93	20	—	0.39	0.03
48	〃	茨城町奥ノ谷	28	36	15	27	91	100	22	—	0.82	0.04
49	〃	鹿島郡旭村箕輪	31	43	23	40	72	116	21	1.2	0.46	0.04
50	〃	那珂湊市平磯町	23	39	19	27	47	93	16	—	0.16	0.04
51	〃	〃 〃	19	35	17	16	27	83	11	—	0.16	0.03
52	〃	勝田市中根	27	40	21	38	63	105	22	1.6	0.77	0.08
53	〃	那珂郡東海村押延	25	36	20	33	53	105	21	—	0.67	0.04
54	〃	〃 〃 〃	24	43	16	33	48	95	21	—	0.96	0.06
55	〃	〃 〃 〃	26	39	23	48	59	100	27	—	0.29	0.03
56	〃	〃 那珂町立石	27	34	18	35	54	124	19	1.9	0.93	0.06
57	〃	〃 〃 東木倉	27	39	21	36	63	125	23	—	0.72	0.09
58	〃	勝田市中根	27	40	21	37	67	109	22	1.7	1.07	0.07
59	〃	〃 〃	22	35	17	38	55	94	23	—	0.35	0.03
60	〃	那珂郡大宮町新町	22	33	19	34	50	115	22	—	0.81	0.05
61	〃	〃 〃 三美	28	36	19	33	55	105	21	1.6	1.09	0.07
62	〃	芳賀郡市貝町平	27	39	22	36	54	102	21	2.0	0.33	0.04
63	〃	〃 〃 〃	22	32	20	32	43	95	19	1.6	0.45	0.02

第5表 テフラ層の微量成分含有量の最大・最小・平均値

テフラ 元素	七本桜軽石層 (n = 5)				今市軽石層 (n = 7)				上部ローム層 (n = 15)				鹿沼軽石層 (n = 18)				下部ローム層 (n = 18)			
	min.	max.	ave.	σ	min.	max.	ave.	σ	min.	max.	ave.	σ	min.	max.	ave.	σ	min.	max.	ave.	σ
Li (ppm)	8	12	10	2	5	22	11	6	20	56	36	8	8	25	12	4	19	34	26	3
Cr (ppm)	25	27	26	1	7	28	16	7	43	78	54	9	1	16	9	4	32	43	38	3
Co (ppm)	26	29	27	1	21	29	24	2	16	36	27	5	4	13	10	3	15	30	20	4
Ni (ppm)	18	22	20	2	15	25	23	3	25	61	40	8	15	29	22	4	16	48	34	6
Cu (ppm)	11	15	13	2	18	40	33	8	49	124	82	22	8	147	13**	31	27	92	59	15
Zn (ppm)	101	112	105	4	54	137	93	27	79	116	100	10	18	66	37	13	83	125	103	11
Pb (ppm)	17	19	18	1	17	32	25	5	14	32	26	5	18	30	23	3	11	27	21	3
U* (ppm)	0.9	1.5	1.2	0.2	1.3	2.4	1.9	0.4	1.3	2.6	2.1	0.4	1.0	1.4	1.3	0.1	1.2	2.0	1.6	0.3
C (%)	0.11	0.35	0.21	0.08	0.57	1.49	0.99	0.38	0.22	1.08	0.72	0.30	0.11	0.87	0.40	0.21	0.16	1.09	0.61	0.29
S (%)	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0.15	0.05	0.05	0.01	0.19	0.08	0.05	0.01	0.09	0.04	0.02	0.02	0.09	0.05	0.02

\* ウランについてはnは各々5, 6, 7, 6, 8である。

\*\* 147 ppm を除いてある。除かない場合は 21 ppm となる

同じ噴火の堆積物である。

赤城火山の活動は、古期成層火山形成期、新期成層火山形成期及び中央火口丘形成期に分けられる (守谷, 1968)。新期成層火山形成期と中央火口丘形成期の間に山頂カルデラが形成された。山頂カルデラ形成後、小沼火山、地蔵岳溶岩円頂丘の形成が行われたが、それに先だって、カルデラを埋める湖成層の堆積、鹿沼降下軽石の噴出があった。

本地域における軽石層の主成分化学組成と給源火山近くの新鮮な同一噴火の噴出物との比較はできなかったが、今市軽石層については今市降下スコリア堆積層と同じ噴火サイクルのスコリア流堆積物のスコリア (山崎, 1957, 第2表, 6) との比較を、七本桜軽石層については七本桜降下軽石層と同じ噴火サイクルの荒沢軽石流堆積物及び竜頭滝軽石流堆積物の軽石 (山崎, 1957, 第2表, 7及び8b) との比較をそれぞれ行った。また、鹿沼軽石層については、太田 (1952) の赤城火山中央火口丘溶岩の見晴山溶岩 (太田, 1952, 第2表) との比較を行ったが、守谷 (1968) は太田の見晴山溶岩は地蔵岳溶岩の一部であるとしている。地蔵岳溶岩は、上述したように鹿沼軽石層と共に中央火口丘形成期の噴出物であるが、同一の噴火サイクルの噴出物ではない可能性もある。

第3表に、これらの噴出物の主成分化学組成と水を差し引いた再計算値とを示す。給源火山近くの噴出物の水の含有量は0.5-2.8%であるが、本地域の軽石層には5-26%の強熱減量がある。この強熱減量の大部分は水と考えられる。水と強熱減量を差し引いた再計算値で両者を比較すると、本地域の軽石層は給源火山近くの噴出物と比べ、SiO<sub>2</sub>とアルカリ金属元素が少なく、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、全鉄及びMnOが多い傾向にある。特に、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>と全鉄が濃集しているように見える。

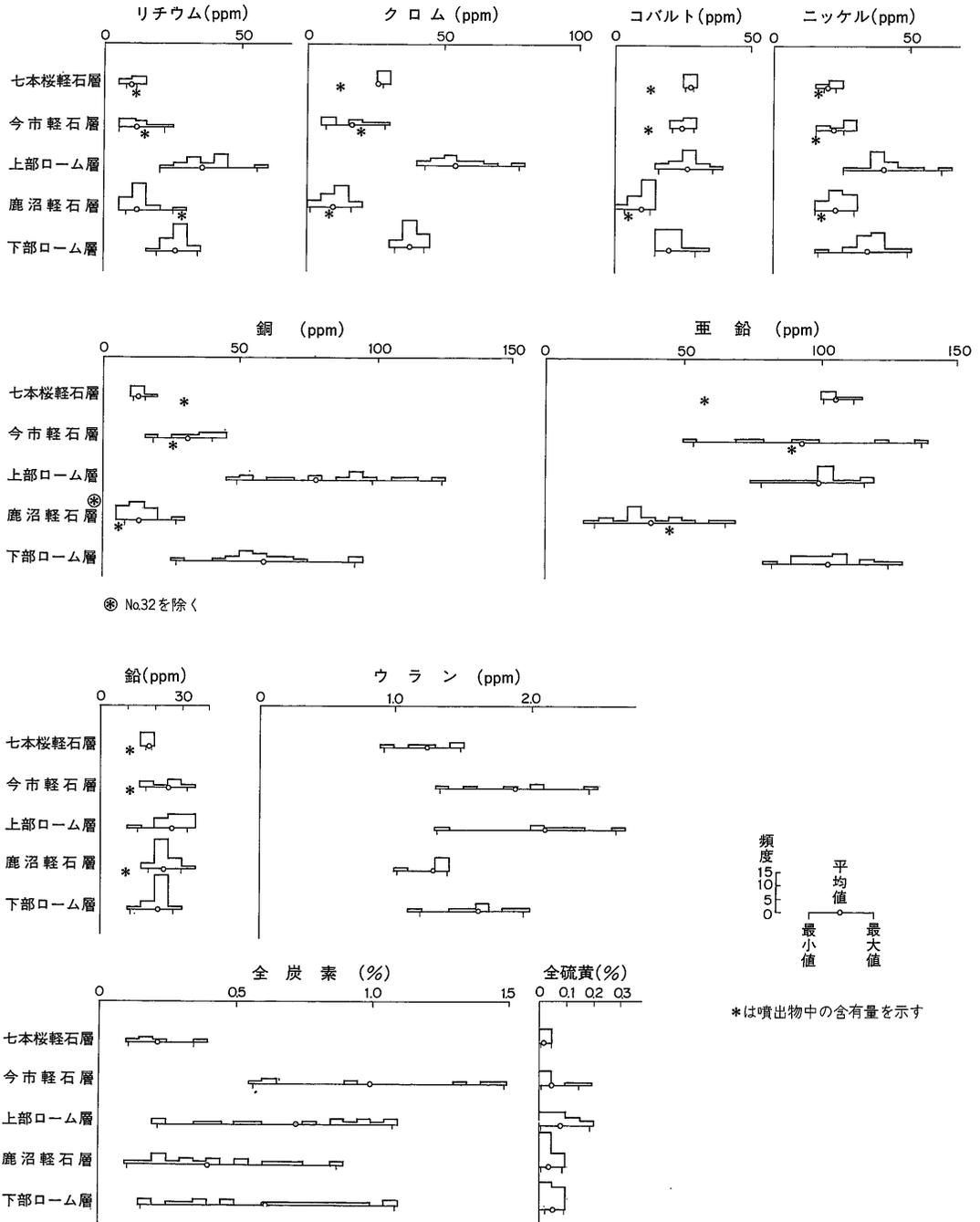
GOLDSCHMIDT は、イオンの電荷とイオン半径からイ

オン電圧の関係を導き、溶液中で陽イオンとして存在する元素群 (Na, K等)、陰イオンとして存在する元素群、水酸化物として沈澱する元素群に分類した (菅原・半谷, 1964)。本地域における軽石層は、非晶質な火山ガラスからなっており、水に溶け易い元素 (アルカリ金属元素やSiO<sub>2</sub>) に乏しく、水酸化物として沈澱する Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> とが特に濃集しているように見えることは、軽石が堆積後に天水あるいは地下水の影響を強く受けたことを示唆している。

LIPMAN (1965) は、半乾燥地の中新世-鮮新世の流紋岩質火山岩の結晶質部分とガラス質部分の化学組成の比較を行い、結晶質部分はガラス質部分より SiO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O が多く、H<sub>2</sub>O(+) と Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> が少ないことを明らかにし、地下水によってガラス質部分の SiO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O が溶脱し、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は不変であるが、相対的に濃集することを明らかにした。また、ARAMAKI and LIPMAN (1965) は、新第三紀の御船流紋岩の含水率の異なる試料について、H<sub>2</sub>O(+) と Na<sub>2</sub>O とに負の相関があることを確かめ、更に荒牧・原村 (1966) は実験によって Na<sub>2</sub>O の減少を示した。

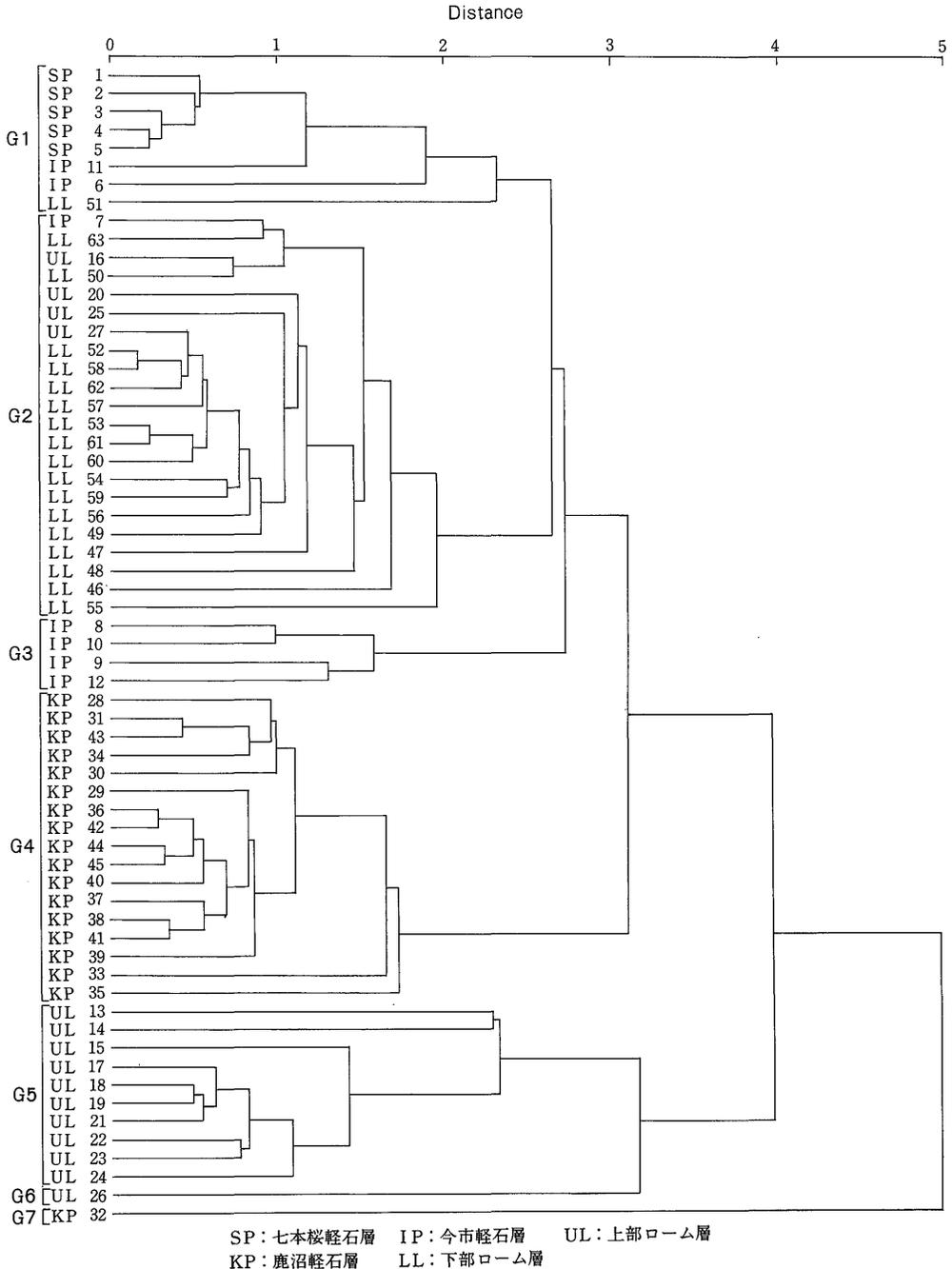
第2表及び第3表の再計算値を使って、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を不変とする計算によって本地域の各軽石層から元素の溶脱がどの程度であるかを検討した。その結果、七本桜軽石層では、SiO<sub>2</sub> と Na<sub>2</sub>O は1/3、K<sub>2</sub>O は2/3が溶脱したように見える。今市軽石層と鹿沼軽石層では、強熱減量がそれぞれ26.6、21.9%であり、溶脱の程度も大きく、SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O の他に CaO や MgO も溶脱したように見える。

この計算は、上述したように同じ噴火の噴出物の化学組成をもとにしたものではなく、更に分析者も異なることから厳密な議論はできない。しかし、発泡が良く多孔質でガラス質からなるこれらの細粒の軽石が、高温多湿



第2図 テフラ層の微量元素濃度のヒストグラム

関東平野北東部における第四紀後期テフラの主成分及び微量成分組成 (金井 ほか)



第3図 テフラ層の微量成分含有量による樹形図

で地下水の豊富な環境で堆積し、これまで報告されていた  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  の溶脱の他に  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  等、他の元素まで溶脱する強い風化作用を受けていたと考えて差し支えないであろう。

4.3 テフラの微量成分化学組成

各種テフラ層から採取した試料中のリチウム・クロム・コバルト・ニッケル・銅・亜鉛・鉛・ウラン・全炭素・全硫黄含有量を試料採取地点と共に第4表に示した。

また、各テフラ層毎の微量元素含有量の最小・最大・平均及び標準偏差値を、第5表に示した。更に、元素含有量の頻度分布を第2図に示した。

環境において人為的な汚染があるとすれば、それはおそらく微量重金属濃度の変化となって現れるであろう。本研究で明らかにした微量元素濃度が、真に人為的な汚染のないバックグラウンド濃度であるとは言い切れないが、おそらくそれに近いものであろう。

従って、鹿沼軽石層の試料の中に銅の含有量が 147 ppm と異常に高濃度のものが存在していた(試料番号 32)が、第2図ではこの値を除いて示してある。これが試料採取時からののか、それとも途中の汚染によるものかは不明である。

リチウムは、七本桜・今市・鹿沼軽石層で平均 10-12 ppm の範囲であるが、上部ローム層及び下部ローム層では平均 36, 26 ppm と高濃度である。軽石層よりも上部・下部ローム層の方が高濃度という傾向は、リチウムの他にクロム、ニッケル、銅等でも認められた。亜鉛は、鹿沼軽石層では平均 37 ppm で、他のテフラ層が 93-105 ppm であるのに対して低濃度である。コバルトもそうした傾向がある。

全炭素含有量のばらつきは大きく、各テフラ層においても約 1% 程度の分布幅を持っている。これは、各テフラ層が堆積した後、種々の植物や微生物が混入したためであろう。幾つかの試料について予備的に炭酸塩炭素を定量したところ、いずれも 0.25% 以下であり、ほとんどが有機態炭素であることが示された。

当地域における微量元素存在量についての報告はほとんどないため比較検討はあまりできないが、齋藤(1984)は日光市・栃木市から採取した七本桜軽石層(1試料)・今市軽石層(2試料)・鹿沼軽石層(1試料)中の銅・鉛・亜鉛・ニッケル濃度を報告している。本研究と比較すると、今市軽石層は、本研究の濃度範囲にあるが、七本桜軽石層では、ニッケルと鉛が高く銅・亜鉛が低く、鹿沼軽石層では、鉛が低い。当地域の試料数が少ないため、このような差異の詳細な比較検討は困難であるが、4.6で述べるような試料中の鉱物組成の不均一性に起因するものと考えられる。

一方、狛ほか(1983)は鹿沼軽石層・今市軽石層中の全硫黄の平均含有量を、それぞれ 0.08%, 0.09% と本研究結果よりも幾らか高く報告している。狛ほか(1983)は、海岸近くで硫黄含有量が高くなることを指摘しているが、その試料採取地点が海岸近くに偏っているため、わずかに高めになったのであろう。本研究の今市軽石層においても、海岸近くで採取した2試料(試料番号6、

7)は、全硫黄含有量が平均値よりも高くなっている。

#### 4.4 クラスタ分析

本研究における試料は、噴出・堆積後長い年月を経ており、風化・変質、更に人為的な汚染を受けている可能性が高い。このような試料を扱う場合に、それぞれの層準の試料の組成が均質であるかどうか調べる必要がある。そこで、各試料の状態を明らかにするためにクラスタ分析を試みた。

クラスタ分析を地質試料に応用した研究例は、動物群による化石相の分類(HAYES, 1980)、地球化学探査に有用な元素の分類(ROY, 1981)などがある。筆者らは、銅・鉛・亜鉛・クロム・ニッケル・コバルト・リチウム等の微量成分含有量をパラメーターとしてクラスタ分析を行い、各試料の均質性を調べた。

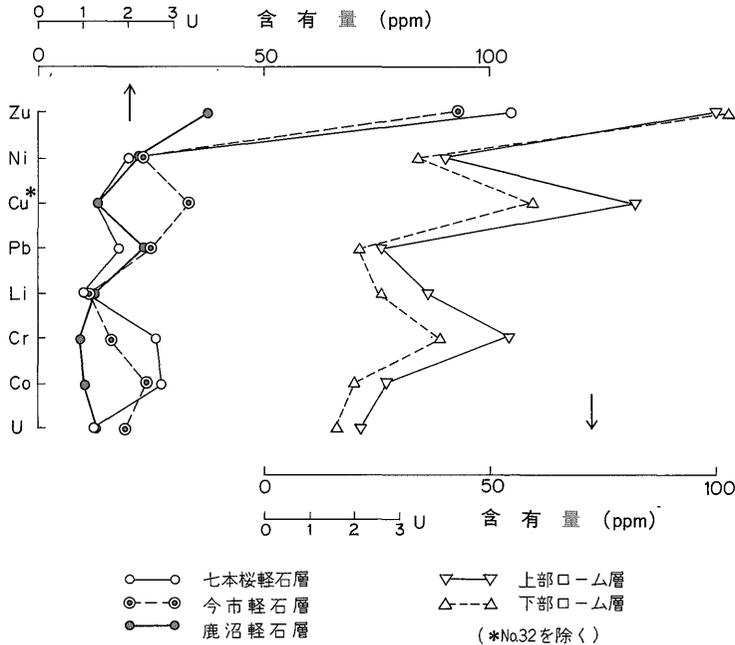
クラスタの距離の計算(飯塚, 1982)には標準ユークリッド距離を用い、重心間距離の小さなものから順にクラスタが融合するようにパソコンでプログラムを組み、クラスタ分析を行った。クラスタの融合によって距離が前回の融合時よりも小さくなる場合には、前回の融合よりも大きいと見なし、第3図に示した樹形図を作成した。

この図では、小さな距離で融合しているものほど類似性が高いことを示している。例えば、試料番号1から5までの七本桜軽石層は距離 0.6 までに全てが一つのグループになっており、かなり均質な試料であったと推定される。一方、試料番号32の鹿沼軽石層は、異常に高い銅のために最後までグループを作れないでいる。

ここで、2.5の距離でグループに分けてみると、第5図で示したG1からG7までのグループとなる。G1には、上述した七本桜軽石層と一部の今市軽石層及び上部・下部ローム層が含まれている。G3は全て今市軽石層である。G4も全てが鹿沼軽石層である。G2及びG5は、主に上部・下部ローム層からなるグループである。上部ローム層と下部ローム層とは、新井ほか(1982)の場合と同様に明確なグループ分けが困難であった。しかし、一部の例外を除き、G2は下部ローム層、G5は上部ローム層のグループという傾向にある。G6には、上部ローム層1試料が含まれている。G7は、上述した銅含有量の高い鹿沼軽石層である。

このように、わずかな試料を除き、七本桜軽石層・今市軽石層・鹿沼軽石層はそれぞれまとまったグループを作っている。しかし、上部ローム層はばらつきが大きく、宇都宮地域における標準層序の田原・宝木ローム層が混在している可能性がある。

以上の検討結果から、各テフラ層相互の関係を見る上



第4図 テフラ層の微量成分平均含有量のパターン

で、G7の試料番号32の銅の値は用いることはできないが、その他の値はほぼ均質な各層準を代表する値とみて差し支えないであろう。

#### 4.5 微量元素含有量の存在パターン

本地域のテフラ層は、微量成分組成のクラスター分析の結果からみてほぼ均質と見なせることがわかった。そこで、微量元素含有量の存在パターンで各テフラ層を特徴づけるため、テフラ層の平均値の元素パターンを第4図に示した。

新井ほか(1982)は、群馬県皆沢で採取したテフラ中の水銀含有量を調べ、その地域の試料では5-77 ppbの範囲内でほとんど差がなかったと報告している。本研究において種々の微量元素を検討した結果、上部・下部ローム層とも他の軽石層よりも含有量が多いが、両者の間では多くの元素において上部ローム層の方が下部ローム層よりも含有量がわずかに多い傾向がみられたのみで、第4図に示されるように類似したパターンを示しており、明確な区分にはいたらなかった。

軽石層では、各軽石層毎に異なる存在パターンを示している。斎藤(1984)は、鹿沼軽石層をはじめとする北関東の4枚の軽石層の亜鉛・ニッケル・銅・鉛・カドミウム含有量存在パターンを例示しているが、鹿沼軽石層の亜鉛・ニッケル・銅・鉛含有量の存在パターンは、本地域試料と同様である。七本桜・今市軽石層及び上部・

下部ローム層の存在パターンの例示は、本研究がはじめてである。

#### 4.6 同じ噴火サイクルの噴出物の微量成分化学組成との比較

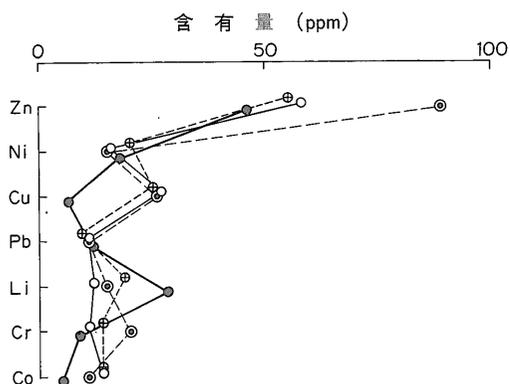
4.2では主成分組成の比較を行ったが、ここでは微量元素組成の比較を試みる。テフラ層の給源火山の噴出物の微量元素組成はほとんど知られていないので、本研究では入手し得る噴出物の微量元素を調べ、その結果を第6表及び第5図に示した。試料は、男体火山については今市軽石層に対応するスコリア堆積物(4試料)、七本桜軽石層に対応する軽石堆積物(2試料)及び七本桜軽石層直後の噴出物として御沢溶岩(1試料)、赤城火山については、鹿沼軽石層と同一の活動期に噴出した中央火口丘溶岩(1試料)である。

男体火山の噴出物では、御沢溶岩とデイサイト質軽石は多少の変動はあるもののほぼ同程度の含有量である。一方、デイサイト質スコリアは前2者と比べると亜鉛の含有量が多い。須藤ほか(1980)も指摘しているように、これらは別々の鉱物組成を持ち、別のマグマ溜りから噴出したと考えるのが妥当であろう。赤城火山については、男体火山とは異なる組成パターンである。

噴出物の試料数が少ないために詳細な検討は困難であるが、第4図と第5図との対比及び第2図から各テフラ層とそれに対応する噴出物とでは微量元素パターンが多

第6表 同じ噴火サイクルの噴出物の微量成分化学組成(単位は ppm)

	男 体 山							赤城山
	御沢溶岩	デイサイト質軽石		デイサイト質スコリア				中央火口丘 デイサイト
	R11978	891	907	847	1010	R11982	R11983	R13505
Zn	55	56	60	86	90	90	90	46
Ni	20	13	20	13	17	15	14	18
Cu	25	28	27	25	27	28	25	6
Pb	9	10	12	10	10	11	12	12
Li	19	15	8	14	16	16	15	28
Cr	14	11	11	26	22	14	19	9
Co	14	14	14	11	11	12	11	5



第5図 噴出物の微量成分平均含有量のパターン

- ⊕ 男体山御沢溶岩(1)
- 男体山デイサイト質軽石(2)
- ⊙ 男体山デイサイト質スコリア(4)
- 赤城山中央火口丘デイサイト溶岩(1)

少異なっている。すなわち、各軽石層とも鉛の含有量が多い。男体火山噴出物と七本桜・今市軽石層とを比べてみると、七本桜軽石層は前者に比べて銅の含有量が少なくて亜鉛・クロム・コバルトが多く、今市軽石層はコバルトが多い。赤城火山噴出物と鹿沼軽石層とでは、リチウム含有量が後者において少ない。このような差異の理由として、溶岩と軽石といった岩質の相違、噴出火山からの距離が異なることに起因する分級、堆積後の変質の程度の相違等が考えられるが、当地域の新鮮な堆積物が無いため、その中のどの作用が卓越していたかは明らかでない。

そこで、軽石層の化学組成と組織との関係を明らかにするため、軽石層を(A)粘土質を主とする部分、(B)磁性を有する部分(主として有色鉱物からなり、鉱物組成は七本桜・今市軽石層が斜方輝石>単斜輝石>鉄鉱物の順に多く、鹿沼軽石層は斜方輝石>角閃石・鉄鉱物の

順である)、(C)その他の部分(主な鉱物組成は、七本桜・今市軽石層が長石>石英の順に多く、鹿沼軽石層は長石・火山ガラスが混じっている)に分け、それぞれの微量元素含有量を調べた。

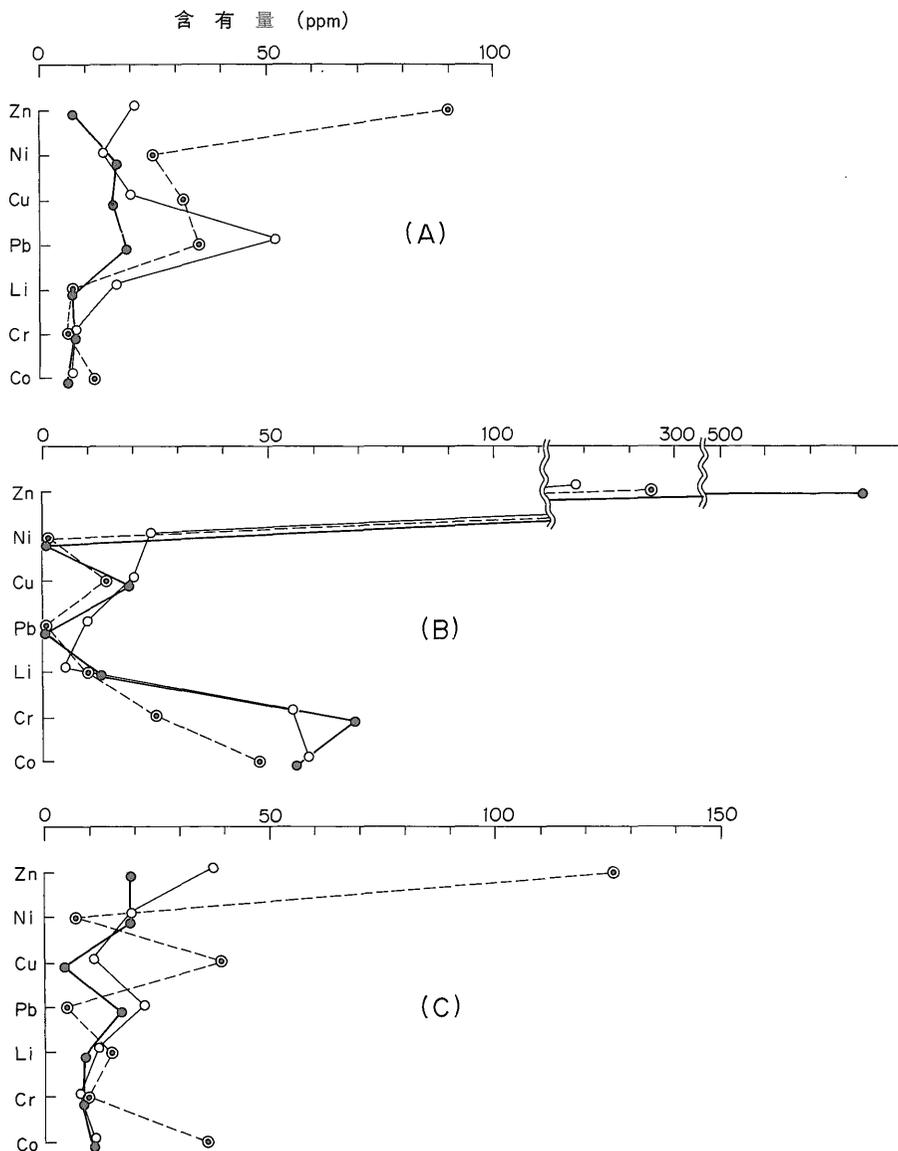
結果のパターンを第6図に示したが、各フラクション毎に元素含有量パターンが異なっている。特に、粘土質部分に鉛の含有量が多く、また、磁性を有する部分に亜鉛・クロム・コバルトの含有量が多いことが特徴的である。この結果から、各軽石層に鉛の含有量が多いのは、給源火山近くに堆積したそれぞれに対応する噴出物に比べて粘土質部分が多いため、また、七本桜・今市軽石層に亜鉛・クロム・コバルト含有量が多いのは、対応する噴出物に比べて磁性を有する部分に富んでいるためと考えられる。クロム・コバルトは、鉱物組成からみて輝石の中に含まれているのであろう(菅原・半谷, 1964)。

遠方に運ばれる噴出物が、分級によって重鉱物類の含有率が高くなるということは考えにくいことで、むしろその逆であろう。磁性鉱物は一般に風化作用に強いことから考えると、遠方においてこのように磁性鉱物類が増えているのは、ガラス質の粘土化・流失による磁性鉱物類の相対的な濃縮、という過程によるものであろう。従って、男体火山噴出物と七本桜・今市軽石層とのこのような微量成分化学組成の相違は、おもに堆積後の風化作用が大きな働きをしていたと考えられる。このことは、4.2において主成分化学組成で風化作用を論じたことと調和的である。

### 5. ま と め

関東平野北東部に広く分布している第四紀後期テフラ層中の主成分(代表的試料)及び微量成分の分析を行い、七本桜軽石層・今市軽石層・上部ローム層・鹿沼軽石層・下部ローム層の化学組成を明らかにした。この化学組成は、当地域のバックグラウンド濃度とでもいうべき人為

関東平野北東部における第四紀後期テフラの主成分及び微量成分組成 (金井 ほか)



第6図 フラクション毎の微量成分含有量のパターン

- |                |          |
|----------------|----------|
| (A) 粘土質を主とする部分 | ○ No. 3  |
| (B) 磁性を有する部分   | ◐ No. 9  |
| (C) その他の部分     | ● No. 37 |

的な汚染をほとんど受けていないものであり、環境化学的にも有用なものである。

各テフラ層の化学組成の特徴として、強熱減量が多いことがあげられる(5-26%)。強熱減量を差し引いて再計算した値で各テフラ層の特徴をみると、七本桜軽石層では、 $\text{SiO}_2 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O}$ が多く安山岩質であるが、今市軽石層は $\text{Al}_2\text{O}_3$ が30%以上と異常に多くま

た $\text{Fe}_2\text{O}_3$ も多い。鹿沼軽石層も $\text{Al}_2\text{O}_3$ が異常に多く、 $\text{CaO}$ も多い一方、 $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ が少ない。微量元素ではクロム・コバルト・亜鉛等が少ない。上部ローム層・下部ローム層は、 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$ が少ない一方、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が異常に多く、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O}$ も多い。微量元素ではニッケル・クロム・銅・リチウム等が多い。

また、テフラ層の微量元素を用いてクラスター分析を

行い、試料の均質性を検討した結果、ほぼ均質であることが確認された。

更に、現在のテフラ層の化学組成(バックグラウンド濃度)と給源火山近くにおける同一噴火サイクルの噴出物の化学組成との比較検討を行った。その結果、対応する噴出物に比べて主成分では $\text{SiO}_2$ ・アルカリ・アルカリ土類金属元素が少なく、微量元素では亜鉛・クロム(七本桜軽石層)・コバルト・鉛(各軽石層)等の含有量が多かった。このような差異は、堆積後天水や地下水などによる溶脱や風化の作用が強く働いていたためであり、また、それは現在の当地域のバックグラウンド濃度をもたらした主な要因でもあったと考えられている。

本研究を開始した後、当地域を覆う広域を対象とした地球化学図の作成プロジェクト(伊藤ほか, 1986など)がスタートした。そのプロジェクトでは主として河川堆積物を扱っているが、本研究のデータはそれの基礎資料となると同時に、それとの対比も検討課題となっている。また、第四紀後期テフラ層のみならず堆積岩についてもその化学組成を明らかにし、今後当地域の堆積岩のバックグラウンド濃度を明らかにすることが重要な課題である。

謝辞 本研究を行うに当たり、火山岩試料の一部として地質調査所登録標本を使用した。また、地質調査所環境地質部 須藤 茂技官からは男体火山の火山岩試料を分けていただき、水野清秀技官には鉱物を見ていただいた。本論文のとりまとめに際して、同所元技術部 藤貫正技官(現 日本分析化学会)・地殻化学部 寺島 滋技官・地質部 一色直記技官から貴重な助言をいただいた。また、同所環境地質部 曾屋龍典技官からは火山岩石学の見地から貴重な御教示をいただいた。以上の方々に厚く御礼申し上げます。

## 文 献

- 阿久津純(1960) 表層地質図「宇都宮」及び同説明書。経済企画庁, p. 1-38.
- 新井房夫・氏家淳雄・飯塚俊彦・斎藤武夫(1982) 北関東ローム層中の水銀濃度。日化, vol. 1982, p. 151-152.
- 荒牧重雄・原村 寛(1966) 火山ガラスの加水に伴う $\text{Na}_2\text{O}$ の溶脱。地質学雑誌, vol. 72, p. 69-73.
- ARAMAKI, S. and LIPMAN, P.W. (1965) Possible leaching of  $\text{Na}_2\text{O}$  during hydration of volcanic glasses. *Proc. Japan Acad.*, vol. 41, p. 467-470.
- HAYES, B.J.R. (1980) A cluster analysis interpretation of Middle Ordovician biofacies, southern Mackenzie Mountains. *Can. Jour. Earth Sci.*, vol. 17, p. 1377-1388.
- 飯塚悦功(1982) 判別関数とクラスター分析。ぶんせき, vol. 1982, p. 354-360.
- 伊藤司郎・柴田 賢・田中 剛・宇都浩三・安藤 厚・寺島 滋・今井 登・金井 豊・坂本 亨(1986) 地球化学図による元素のバックグラウンドと人為汚染の評価技術に関する研究。昭和60年度国立機関公害防止等試験研究成果報告書, 82-1-82-17.
- 関東ローム研究グループ(1965) 関東ローム—その起源と性状。築地書館, 東京, 378 p.
- 粕 武・坂本 亨・安藤 厚(1983) 茨城県中部地域における上部新生界堆積岩の全硫黄と堆積環境。地調月報, vol. 34, p. 279-294.
- LIPMAN, P.W. (1965) Chemical comparison of glassy and crystalline volcanic rocks. *U. S. Geological Survey Bull.*, 1201-D, 24 p.
- 町田 洋・新井房夫・小田静夫・遠藤邦彦・杉原重夫(1984) テフラと日本考古学。渡辺直経編「古文化財に関する保存科学と人文・自然科学」, p. 865-928.
- MORIMOTO, R., OSSAKA, J. and FUKUDA, T. (1957) Geology of Imaichi district with special reference to the earthquake of Dec. 26, 1949 (III). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 35, p. 359-375.
- 望月常一・大場きみじ(1970) 岩石中のウラン分析法。地質調査所化学分析法, no. 46, 7 p.
- 守屋以智雄(1968) 赤城火山の地形及び地質。53 p.
- 大森貞子(1978) ケイ酸塩岩石の迅速分析法。地球科学的試料の化学分析法2, 地質調査所, p. 290-304.
- 太田良平(1952) 赤城火山溶岩の研究。地調報告, vol. 151, p. 4.
- ROY, A. (1981) Application of cluster analysis in the interpretation of geochemical data from the Sargipalli lead-zinc mine area, Sundergaph District, Orissa (India).

- Jour. Geochem. Explor.*, vol. 14, p. 245 - 264.
- 斎藤武夫(1984) 北関東地方の第四紀テフラ中のカドミウム, 銅, 鉛, ニッケルおよび亜鉛濃度. 日化, vol. 1984, p. 552-556.
- ・飯塚俊彦・氏家淳雄・新井房夫(1982) 北関東ローム層中の化学成分. 日本地球化学会年会講演要旨集, p. 38.
- 坂本 亨(1975) 「磯浜」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, 55 p.
- ・相原輝雄・野間泰二(1981) 「石岡」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, 50 p.
- ・田中啓策・曾屋龍典・野間泰二・松野久也(1972) 「那珂湊」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, 94 p.
- 菅原 健・半谷高久(1964) 地球化学入門. 丸善, 東京, p. 74.
- 須藤 茂・山崎正男(1980) 男体火山活動末期における斜め噴火と異種マグマの連続噴出. 火山, vol. 25, p. 75-87.
- 寺島 滋(1979) 原子吸光分析法. 地球科学的試料の化学分析法 3 及び付録, 地質調査所, p. 697-698.
- 山崎正男(1957) 男体火山末期の活動. 火山, 2集, vol. 2, p. 66.
- (受付: 1985年6月7日; 受理: 1988年9月26日)