南関東における第四紀中・後期の示標テフラ層に含まれる鉄—チタン酸化鉱物の特性¹⁾

青 柳 隆 二²⁾

Characteristics of Fe-Ti Oxide Minerals in Middle and Late Pleistocene Marker-tephras of South Kanto, Central Japan¹⁾

Ryūji AOYAGI²⁾

This paper presents the following matters about the Fe-Ti oxide minerals contained in the 75 tephras, which are about 70% of marker-tephras sedimented on Oiso Hill, 25 km east of Hakone Volcano.

Examination of the content, occurrence and type of Fe-Ti oxide minerals clarifies the following features:

- 1) There is a positive correlation between the refractive indices of orthopyroxenes and the TiO_2 content of titanomagnetite.
- 2) In many cases, the TiO_2 content of ferromagnetic minerals enable us to identify each tephra.

Then it is shown that the tephras, which can't be identified by similar TiO_2 content, can be identified by the combination of the ratios of ferromagnetic minerals, Mn/Fe and V/Ti , V/Mn and Ti/Zn .

Moreover others, which can't be identified, can be distinguished by the content of ferromagnetic minerals, that of β -phase, and the ratio of attached minerals.

I. ま え が き

筆者は近年、大磯丘陵などの南関東のテフラ³⁾を対象として、これに含まれる強磁性鉱物の化学組成によるテフラの同定法を検討してきた。大磯丘陵のように、単一火山の噴出による類似の多数の示標テフラ層が堆積している地域で、これに含まれる強磁性鉱物の化学組成を湿式法で分析を行いテフラを同定するためには、試料の調製から分析方法まで高い精度が要求される。そのため、まず分析試料の作製方法と純化の関係などの基礎的な問題について検討して、最終的に TiO_2 含量、および微量成分元素の組合せによる同定法を報告した (青柳, 1983 ; 1985)。

強磁性鉱物の化学組成をテフラの同定や対比に用いる有効性は、ある特定の成分や、いくつかの成分の組合せで同定・対比が可能となり得ると同時に、岩石学、火山学的にも有用な資料の提供が期待できることである。

本研究に用いたテフラは、大磯丘陵で採集した示標テフラ層と、大磯丘陵以外で採集した南関東の主要示標層を合わせた約 75 枚のテフラである⁴⁾。本文では、従来一般に磁鉄鉱として一括して扱われている Fe-Ti 酸化鉱物について、まず、これらの種類とその含有率、および共存する他の鉱物に付着・包有されている量比について報告する。次にすでに報告した (青柳, 1985) 強磁性鉱物の化学組成による同定法に加えて、Fe-Ti 酸化鉱物の岩石記載学的な結果を用いた Fe-Ti 酸化鉱物による

1) 1984 年 9 月 7 日受付。1983 年 8 月、日本第四紀学会にて一部発表。

2) 川崎市立宮崎中学校。Miyazaki Lower School, Kawasaki

3) 本論文では、混入している岩片などその活動期の本源マグマ以外の物質を除いた、主に軽石、稀れにスコリアについて用いている。

4) これらの示標テフラ層には、第四紀中・後期の箱根火山を給源とする主要な構成メンバーはすべて含まれている。

図1 研究試料の調製法

同定法を検討する。さらに町田ほか(1974)、新井ほか(1977)の斜方輝石の屈折率と、主要な強磁性鉱物であるチタン磁鉄鉱の TiO_2 含量との関係について報告する。

本文で扱う Fe-Ti 酸化鉱物は、スピネル構造の TiFe_2O_4 - Fe_3O_4 固溶体の強磁性鉱物であるチタン磁鉄鉱(以後 β 相とする)と、ロンボヘドラル構造の TiFeO_3 - Fe_2O_3 固溶体で磁石につかないチタン鉄鉱(α 相とする)である。従って、本研究で用いる強磁性鉱物は磁石に付く鉱物を意味し、 β 相のみ、もしくは β 相に α 相が付着しているもの、または高温・低温酸化による α 、 β 両相の離溶構造を示す Fe-Ti 酸化鉱物を一括してよんでいる。

II. 方法

(1) テフラの層序と名称、採集場所、および採取方法

大磯丘陵のテフラの層序と命名法は立川・武蔵野両ローム層、および下末吉ローム層の上部は関東ローム研究グループ(1965)、町田・森山(1968)、それより下位は町田(1971)、町田ほか(1974)にしたがい、これに記載されていないテフラは上杉(1976)などの関東第四紀研究会による層序と命名法を用いた。

テフラの試料は町田ほか(1974)、新井ほか(1977)以外に、平塚市博物館資料(1980)に基づいて採集して、採集場所を表1にまとめた。層厚が40 cm 前後の一噴火輪廻の堆積物(中村ほか, 1963)による単層で分級化の認められない示標層は上下2層に、さらに厚い層では約30 cm 間隔に分けてテフラを採取し、また分級化の認められる層については、その fall unit ごとに採取した。

(2) 鉄-チタン酸化鉱物の存在状態と含有率の調べ

方

表1に示した採集試料の風化程度の判定は、軽石の場合、噴出当時の固さを保持していて、約20%のNaOH水溶液によってのみガラス質部分の溶解が可能な試料、およびスコリアではNaOH水溶液による溶解が不能で、砲金製乳鉢で試料を粉碎しなくてはならない程度の固さを保持しているものをともに風化程度Aとした。色はほぼ白色⁵⁾に近く原形を保っているが、風化により木槌で粉末化の可能な軽石を風化程度Bとした。風化によって着色し、土壌化の進んでいる試料を風化程度Cとした。

表1に示した純化程度の判定は、採集した軽石を十分に水洗して、風乾後水に浮いた塊のみを集め、これを純化程度Aとした。発泡が悪く、沈み易い軽石やスコリアで表面に付着している不純物がほぼ除去できる純化程度をBとし、粘土化が進みしかも塊がつぶれたりして純化の不能なものを純化程度Cとした。

この純化につづく試料の調製法を、おもに化学分析試料の作成過程を中心として、その概略を図1に示した。

表1の強磁性鉱物の含有率は、図1の7の過程に示したように磁製乳鉢中で十分に粉末化して磁石に付く物質を秤量し、全試料に対する重量百分率として求めた。

この強磁性鉱物の含有率や、Host 鉱物⁶⁾に対する強磁性鉱物の含有率および α 相の含有率は、その精度を高めるために同一のテフラを、同一採集地点の同一層準で別の箇所から採集した2点以上の試料について測定を行い、平均値で示した。

図1における3の過程で採集した強磁性鉱物は、単独粒、または Host 鉱物に付着したり、包有された状態(包有物を含めて本文では付着粒とよぶ)として存在する。そこで、まずこの図1の3で採集した磁石に付いた

5) 赤味の濃いテフラもあるが、未風化か風化かは、外観などから比較的容易に判断できる。

6) ここでは Fe-Ti 酸化鉱物を包有したり、付着させている珪酸塩鉱物を Host 鉱物とする。

鉱物を秤量する (A)。ついでこれを磁製乳鉢中で粉末化して、再び磁石で強磁性鉱物を集めて秤量し (B)、この A, B から $(A-B)/A \times 100(\text{wt}\%)$ を求めて付着率とした。

Fe-Ti 酸化鉱物のうち磁石に付かない常磁性体の α 相は、次の方法で採集・測定を行った。図 1 の 3 の過程で磁石に付く鉱物のすべてを採集した残部について、比重の小さな斑晶鉱物を Punning で除いていくと、 α 相の多く含まれる粒が残る。しかし、さらに Punning を続けると α 相の粒も流出するおそれがあるので、他の鉱物が混入していてもある程度で Punning をやめて、この残部を仮の α 相として秤量する。次にこの残部を双眼実体顕微鏡下で α 相などの不透明鉱物、有色鉱物、白色鉱物の 3 種類に分けて、それぞれの容積比を計測する。不透明鉱物には α 相の単独粒、 α 相に β 相の付着した粒、および α, β 両相の判別のできない粒の 3 通りがある。判別できない粒はすべて α 相とする。 α 相に付着した β 相の容積比を求めて、これを不透明鉱物の容積比から除いた値を α 相の容積比とした。各鉱物の比重を考慮して、 α 相の容積比を重量比にかえる。 α 相の重量比を仮の α 相の重量に乘じて α 相の重量を算出して、試料全体に対する百分率を求めた。

(3) 鉄-チタン酸化鉱物の含有率の測定誤差

図 1 の 2 で未風化の軽石はガラス質部分、風化した軽石では粘土質部分を水洗除去する際に、微小の Fe-Ti 酸化鉱物が流出し易い。そのために強磁性鉱物、および α 相の含有率は 1% を限度として少なく見積られる可能性がある (誤差 A)。風化程度 B, C の試料は、その一部を 140°C で 4 時間ほど乾燥させて含水率を求めた。この測定の際のバラツキは $\pm 2\%$ 以内である (誤差 B)。未風化の軽石は室温で十分乾燥させると水分はなくなるので含水率は求めない。このために強磁性鉱物、および α 相の含有率は、風化程度 A とした未風化軽石では誤差 A による原因で 1% 小さい値、風化程度 B, C のテフラでは誤差 A+B で 3% 以内の誤差がそれぞれ考えられる。

付着率を調べるには、溶解したガラス質部分や粘土の大部分を水洗除去してから、水中で磁石に付く鉱物を集める (図 1 の 3)。このさい磁性のない他の鉱物粒子もまぎれ込んで磁石に集まる。そこで磁石に付いた鉱物を磁石から離して水中に移し、まぎれ込みが少なくなるように磁石と鉱物の距離を 3 段階に分けて、再び磁石で集めるようにする。これを繰返すとまぎれ込みの粒は減るが、強磁性鉱物と、これが付着していた Host 鉱物が

分離して、この Host 鉱物とまぎれ鉱物が磁石に付かないで残るようになるので、繰返しは 3 回でやめる。この際、磁石に集まるまぎれ鉱物は全量 4 g に対して 0.1 g を限度として含まれるので、それによって 3% 以内の誤差を生ずる。

α 相の含有率は、前述の強磁性鉱物の含有率と同様に風化程度 A は 1% (誤差 A)、風化程度 B, C は 3% 以内 (誤差 A+B) の誤差以外に次のような原因の誤差が加わる。1) 強磁性鉱物の含有率を求めるために、磁石に付く鉱物を採集する。この際に β 相に付着している α 相も抽出される。2) Punning で最後に残る部分には α 相以外に、共存する他の鉱物も含まれている。これらの容積比を鏡下で計測するが、不透明鉱物の全体に対する割合、および有色鉱物と白色鉱物の割合では、それぞれ計測最大誤差が $\pm 8\%$ 、 α, β 両相の比では最大誤差は $\pm 5\%$ で、これらがすべて加算された場合には $\pm 21 \text{ wt}\%$ の相対誤差となることが考えられる。実際に繰返し測定を行った結果、この計測誤差に前述の誤差 A、または A+B の加わった値は、相対誤差として $\pm 20\%$ の範囲内ではばらつくことが稀ではない。そこで、 α 相の含有率はこの $\pm 20\%$ を許容範囲として平均値で示した。 $\pm 20\%$ は実際に求めた含有率の有効数字でみると、一桁目の $\pm 0 \sim 2$ が誤差の範囲となる。3) α, β 何れの相か不明である不透明鉱物が 5~15% ある。この 1) と 3) の誤差を見積することは困難である。そこで、これらの誤差の大きさ、数値の本来の意味を考えて、含有率を次のような 7 階級で表わすことにして表 1 に示した。A : 0.04~0.02%, B : 0.019~0.01%, C : 0.009~0.005%, D : 0.004~0.001%, E : 0.0009~0.0005%, F : 0.0004~0.0001%, G : 0.0001% 以下。なお誤差の範囲からみて、各試料はその表示した階級の上下のどちらかの階級に属することがある。

(4) 化学分析の試料の調製、分析方法とその誤差、および X 線回折による試料の同定

化学分析試料の調製法の詳細は青柳 (1983)、化学分析方法とその誤差については青柳 (1985) に記した。また、X 線回折による試料の同定は青柳 (1970, 1983) と同じである。

III. 結果と考察

(1) 鉄-チタン酸化鉱物の種類、存在状態、および含有量

1) 鉄-チタン酸化鉱物の種類と存在状態

磁石に付く、従来強磁性鉱物とよんでいる鉄-チタン

表 1 テフラの層序と採集場所, テフラの風化, 純化程度および鉄-チタン酸化鉱物の含有率と付着率

示 テ フ ラ	標 名	採 集 場 所	風化程度*	純化程度**	強磁性鉱物 の 含 有 率	チタン鉄鉱 の 含 有 率	付着率***	その他**** の特徴
CCP	4	箱 根 峠	B	A	2.45	G	58.1	Ho(On)
	3	元 箱 根	B	C	3.19	G	57.5	
	2	〃	B	C	4.20	G	54.8	
	1	〃	B	C	3.65	G	43.0	
SP		〃	B	C	4.51	G	23.8	
TPf		{ 平塚・遠藤原	A	A	2.25	B	66.1	
			A	A	2.22	B	58.5	
TP	1	平塚・吉沢・台	A	A	0.52	B	42.4	
	2	〃	A	A	0.66	A	38.5	
	3	〃	A	A	0.69	A	37.1	
	4	〃	A	A	0.60	A	39.8	
	5	〃	A	A	0.60	A	42.7	
	6	〃	A	A	0.59	A	45.2	
	7	〃	A	A	0.40	A	50.1	
MPf		小田原・星山	A	A	0.65	B	41.3	
MP		平塚・吉沢・台	C	C	3.00	C	54.1	
AP		〃	C	C	1.90	D	54.0	
YP		〃	B	B	0.23	C	31.6	
OPf		山北・大口橋	A	A	0.38	B	45.4	
			B	A	0.39	D	44.3	
OP		{ 平塚・中吉沢	B	A	0.37	D	42.6	
			A	A	0.36	D	35.7	
Pm-1		伊那東部中学	A	A	0.08	D	14.9	
KmP	12	平塚・人増	C	B	0.67	D	47.0	
	10	〃	B	A	0.60	E	42.4	
KmP	9	〃	A	A	0.22	C	20.8	
		{ 〃	A	A	0.37	E	44.7	
	7		A	A	0.32	E	42.3	
			A	A	0.32	E	42.3	
		{ 〃	A	A	0.60	C	36.9	
	6		A	A	0.62	C	36.2	
			A	A	0.67	C	38.0	
		{ 〃	A	A	0.47	C	34.4	
	5		A	A	0.40	C	35.5	
			A	A	0.60	C	31.6	
	3	〃	B	B	1.13	D	26.5	(Fu ?)
	2	〃	B	A	0.27	C	37.5	
			B	A	0.35	B	30.6	
			B	A	0.55	B	26.1	
	1	{ 平塚・出縄	A	A	0.55	B	28.2	
			A	A	0.48	B	28.2	
			A	A	0.48	B	30.6	
K1P	15	平塚・土沢中学北	B	B	0.40	D	34.0	
	14	〃	B	A	0.32	C	29.0	

示 テ フ ラ 名	採 集 場 所	風化程度*	純化程度**	強磁性鉱物 の含有率	チタン鉄鉱 の含有率	付着率***	その他**** の特徴
13	{ 平塚・土沢中学	B	A	0.40	D	24.7	Ho(?)
		B	A	0.31	D	32.9	
		B	A	0.35	D	35.9	
12		B	A	0.55	D	45.2	
11	{ "	B	A	1.10	C	42.8	
10		B	A	1.00	C	54.6	
KIP 9		A	A	0.42	D	26.9	
		A	A	1.30	F	31.1	
8	{ "	A	A	1.20	F	33.7	
		A	A	1.50	E	31.2	
		A	A	0.48	A	50.3	
7		A	A	0.43	A	38.5	
	{ "	A	A	0.95	A	43.3	
6		A	A	0.64	A	37.1	
		A	A	0.20	D	33.9	
5		A	A	0.20	D	33.9	
4	平塚・庶子分	A	C	0.41	D	23.3	
3	"	A	A	1.70	C	39.9	
2	"	A	A	1.50	A	49.2	
1	"	A	A	2.00	C	45.0	
TAu 12	{ 真 鶴	A	A	0.15	C	34.5	Ho(?)
		A	A	0.16	C	34.4	
		A	A	0.15	C	30.6	
		A	A	0.18	D	28.1	
11	中井町岩倉	A	A	0.18	D	28.1	
9	"	C	C	0.95	A	56.7	
7	"	B	B	2.18	E	49.1	
	{ "	C	B	1.62	A	42.6	
6		C	B	1.34	A	38.3	
		B	B	0.30	A		
5		B	B	0.30	A		
Tu 20	"	B	B	0.60	B	30.0	
TAu 4	平塚・七国峠	C	C	0.23	D	12.1	Ho(?)++
2	"	C	C	1.21	D	60.0	
TAu 1	平塚・七国峠	B	B	0.21	D	37.7	
TAm 7	{ "	B	A	0.71	B	32.9	
		B	A	0.59	B	40.4	
		B	A	0.37	C	22.7	
		A	A	0.26	C	20.9	
5	{ 平塚・早田口	A	A	0.30	D	19.6	
		B	A	1.20	C	22.2	
		A	A	1.20	C	22.6	
4		A	A	1.06	C	26.8	
2	平塚・早田	B	A	0.31	D	36.3	
lpf	"	B	A	0.29	B	33.6	
	{ "	B	A	0.29	A	25.5	
1		B	A	0.29	A	27.0	
		A	A	0.28	A	27.6	
		A	A	0.40	A	43.9	
TAI 3	{ 平塚・七国峠	A	A	0.41	A	46.0	

示 テ フ ラ	標 名	採 集 場 所	風化程度*	純化程度**	強磁性鉱物 の 含 有 率	チタン鉄鉱 の 含 有 率	付着率***	その他**** の 特 徴
TAI	1	平塚・七国峠	B	B	0.22	B	20.7	Ho(?)
TB	9	平塚・早田横山農園	B	A	2.00	C	18.7	Ho(?)
			B	B	0.10	D	33.5	
	8	{ "	B	B	0.28	C	10.9	Ho(?)
			B	B	0.10	C		
			A	B	0.81	D	29.6	
	7	{ "	A	A	0.20	D	36.4	
			A	A	0.23	B	29.8	
	6	"	B	A	3.50	B	13.1	
	5	"	B	B	3.40	A	4.1	Ho(?) +
	2	"	C	C	0.42	D	15.7	
			C	C	0.79	B	38.6	
	1	{ 平塚・土沢中学北	B	B	0.60	B	35.9	
			B	B	0.59	A	30.6	
TCu	4	中井町鴨沢	A	A	0.18	C	19.6	Ho(?) +
	3	"	B	B		C		
	2	{ "	B	B				
			B	B				
lf		中井町雑色	A	A	0.12	B	31.0	
			A	A	0.09	B	37.5	
	1	{ "	A	A	0.11	A	29.6	
			A	A	0.13	A	29.1	
TCl	5	中井町藤沢	B	C	0.19	D		
	3	"	B	C	0.39	D	50.4	
	1	"	B	C	0.93	D		
GP		佐久・金山	B	A	0.01	B	12.3	Ho(Ya)+++

*, **, ***: いずれも方法(2)参照

****: Ho 含角閃石テフラ。無記入は両輝石テフラ, または含かんらん石テフラですべて箱根火山を給源とする。

() 中は箱根以外の給源火山, On: 木曾御岳, Fu: 富士, Ya: 八ヶ岳。これらはすべて KIP 1 より上位は新井ほか (1977), 下位は町田ほか (1974) による。

+, ++, +++ は図 1 の 12 に示した分析試料に含まれる α 相の量比。結果と考察 (I)-4) 参照。

酸化鉱物の大部分は β 相である。この β 相は自形や球状の単独粒として、また輝石類などの共存鉱物に付着したり、包有されている (青柳 1970)。

α 相は自形の単独粒、もしくは β 相に付着した状態で存在し、 β 相以外の共存鉱物に付着したり包有されることは珍らしい。

α , β 両相が高温酸化などで離溶構造を示す粒子は、反射顕微鏡による観察結果では、箱根火山の供給テフラではきわめて稀にしか存在しなかった。

本研究の化学分析試料のうち、箱根火山を給源とするテフラには、X線回折法で明瞭に α 相が検出される試料はなかった。一方、遠来の含角閃石テフラにはX線回折法で α 相の検出される試料が多かった。

この理由は、分析試料の作成中に前者では α 相が分離抽出されるのに対して、後者は微粉末化しても α , β 両相の完全な分離が不能な状態で晶出しているためと考えられる。

2) 強磁性鉱物の含有率

軽石の風化は、まずガラス質部分の溶脱と粘土化が進む。そのために同一層準の軽石でも、未風化と風化では全試料に対する造岩鉱物の含有量は異なってくる。そこで本研究ではできるだけ未風化の試料を扱うことにした。

表 1 によれば調査地域の試料に含まれる強磁性鉱物の含有率は 0.2~0.6% の範囲にわたるものが最も多かった。KmP 3, KIP 1~3, 8, 10, 11, TAu 6, TAm 4 の試

料は 1~2%, CCP 1~4 (5は未調査), SP, TPf, TAU7 は 2% 以上の高い含有率を示す。一方, TAU 12, TCu 1 は 0.1~0.15%, Pm-I は 0.08% 前後で低く, これより小さな含有率を示す試料はなかった。

これらのうち KmP 3 と Pm-I 以外は, すべて箱根火山を給源とする。KmP 3 は新井ほか (1977) によると富士火山を給源とする可能性があると指摘されているが, 強磁性鉱物の含有率でも, この時期の箱根火山の試料とは著しく異なる値を示している。1~2% の含有率を示す層準は KIP の最下位と中位, TAU と TAm のそれぞれ中位の層準である。また, 2% 以上の高い強磁性鉱物の含有率を示すテフラは, 箱根火山の軽石の噴出では晩期にあたる TPf から始まる一連の噴出物で, MPf や OPf などほぼ同じ時代の同一起源の火砕流噴出物に比べて, きわだって異なる値を示している。

3) 強磁性鉱物を付着・包有している共存鉱物の割合 (付着率)

同一のテフラに含まれる強磁性鉱物を単独粒, 他の共存鉱物に包有された粒子, および付着している粒子の3種類に分け, その量比を求めることは技術的に困難である。そこで方法(2)で説明したように, 強磁性鉱物を付着・包有している Host 鉱物の割合を表わす一方法として, “付着物/(強磁性鉱物+付着鉱物)”の重量%を付着率と名付けて表1に示した。

表1によれば, 多くの試料では磁石に付く鉱物のうち 25~45% が Host 鉱物で, Host 鉱物の量の多いことを示している。ことに強磁性鉱物の含有率の高いことで特異な TPf や CCP はこの付着率も大きく, 強磁性鉱物の占める割合は 30~40% のみである。その他, 箱根火山の両輝石テフラの AP, MP, TAU 9 も付着率が大きく, 強磁性鉱物は 43~46% である。

一方, 同じ箱根火山を給源とする KIP 13 上部, TAm 5, TAm 4 の中上部は逆に付着率が小さく 80% 近くが強磁性鉱物であることを示している。また, KIP には付着率の小さな試料(カッコ内は付着率) {KIP 5 (25.7), KIP 9 (26.9), KIP 13 上部 (24.7), KIP 14 (29.0)} と, 付着率の大きな試料 {KIP 2 (49.2), KIP 12 (45.2)} があり, 同一累層内の同一給源のテフラでも Host 鉱物の量比には大きな違いのあることがわかる。

この付着率で特徴的なことは, 一枚の単層内でも下部から上部にかけて大きく変わる例が稀ではないことである。なかでも下部から上部にかけて付着物が増加するテフラが多い。この変化の著しいテフラ (カッコ内は上下の付着率の差) は OP (8.6), KIP 7 (11.8), TB 7

(18.1), TCu 1 (8.4), 逆に下部から上部に付着率の減少するテフラは KIP 13 (11.2), KIP 6 (6.2) などである。

これら箱根火山供給のテフラの強磁性鉱物はすべて β 相と考えてよいので, この β 相の独立粒, 付着粒, および含有粒の化学組成を EPMA などの方法でくわしく調べることで, 単層内における付着率の下部から上部に増加する型と減少する型の原因が, マグマ溜りの有無などの関連で考察できると考える。このことは今後に残された課題である。

付着率が 20% 以下の小さな値を示す試料は含角閃石テフラに多く見られる傾向がある。

4) α 相の含有率

化学分析試料で, α 相の含有率が表1のその他の特徴で +++ で示した GP には分析試料の約 25%, ++ で示した TAU 4 は約 15%, + の TCu 4, TE 5 で 10% 前後の α 相を含む (青柳, 1983)。これらはすべて含角閃石テフラで, α , β 両相が微粉末にしても分離不能の粒子が多い。一方, 箱根火山を給源とするテフラのすべての化学分析試料は, X線回折法で α 相の検出ができない。箱根火山のテフラは, α 相が単独粒, もしくは β 相に付着して β 相との分離が容易な状態で存在する。本研究方法による α 相の含有率は, 表1のように 0.04% を越えない。

α 相の含有率は階級 C (0.005~0.009%) の試料が最も多く, 次いで階級 B (0.01~0.019%) の試料である。これ以外の階級に属する試料は少いので, テフラの同定の一助となる。

5) 強磁性鉱物の含有率と付着率の相互関係

強磁性鉱物の含有率と付着率の相互関係を図2に示した。この図では, やや特異な値を示す試料についてのみテフラ名を記した。

図2に示すように, 箱根火山を給源とする未風化テフラに含まれる強磁性鉱物には, 含有率と付着率の間に正の相関関係が認められる。この関係は含有率が 1% 前後を境としてやや異なり, 含有率が 1% 以下よりも 1% 以上でより密接である。

このように両者が正の相関関係を示す原因としては次のようなことが考えられる。すなわち, 含有率の大きな値を示す試料は, β 相の粒子が比較的早期から晶出をはじめ, 晶出は軽石噴出まで続いた (その後, 溶岩を流出する場合は, マグマ中ではさらに後まで晶出が続いたであろう (大島 1975))。したがって β 相晶出と同時に, もしくはそれ以後に晶出してくる斑晶鉱物 (Host 鉱物)

図 2 強磁性鉱物の含有率と付着率の関係

● : 未風化の両輝石テフラ, □ : 風化した両輝石テフラ
 × : 未風化の角閃石テフラ, △ : 風化した角閃石テフラ

にとり込まれる場合が十分考えられ、 β 相そのものの量も多いことが推定できる。それに対して、軽石噴出直前に近い時期にしか β 相の晶出条件がないような場合は、Host 鉱物にとり込まれる割合も少なく、強磁性鉱物の含有率も少ないことになるかと推定される。

(2) 強磁性鉱物の化学組成に関する特性

1) テフラの同定

筆者はさきに、大磯丘陵を中心とした南関東の主要示標テフラ 55 枚を対象として、これに含まれる強磁性鉱物の主成分による同定の可能性を検討した(青柳 1983)。これに用いた試料は主成分の合計($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$)が 93~95 wt% で、 TiO_2 含量 (以後 TiO_2 量とする)が同定に有効であることを報告した。その後これらの試料には 0.6~2.0 wt% の SiO_2 を含み、さらにこの数値の約 2 倍の共存鉱物を含んでいることが推定された(青柳 1985)。そこで、 TiO_2 量を wt% で表わすよりも、強磁性鉱物の化学組成を主成分の三成分系 ($\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{TiO}_2$) として、その mol% で TiO_2 量を示すほうが、混入している共存鉱物の影響が小さくなり、同定により有効な数値が与えられると考えて、 TiO_2 mol% を層準

にしたがってグラフ化したのが図 3 である。

図 3 によれば TiO_2 量は 13.0~16.5 mol% の範囲の試料が多く、特に 14.0~15.5 mol% の範囲に集中している。一方、この 13.0~16.5% の範囲外の TiO_2 量を示すテフラは少ないので、野外観察の結果を合わせれば他のテフラからの区別はできる。また、 TiO_2 量が類似しているテフラでも、野外観察の結果と同定するテフラ、および上下何枚かのテフラを合わせることにによって、それぞれの TiO_2 量とその変化の傾向から区別のできることが多い(青柳 1983)。しかし、給源から離れた地域では示標テフラが少なくなり、上記の方法のみではテフラの同定が不能な場合があるので、 TiO_2 量に加えて副成分を含めた元素比の組合せ法を用いると同定が確実となる(青柳 1985)。

ここではまず、 TiO_2 量の似た試料をグループに分けて、それぞれのグループについて Mn/Fe と V/Ti の元素比の組合せでテフラを区別した(図 4-1, 4-2, 4-3)。まず TiO_2 量が 14.0~14.6 (図 4-1), 14.4~15.1 (図 4-2), 14.9~15.5 (図 4-3) 各 mol% の 3 グループに分けて、それぞれのグループについて元素比によるテフラ

図 3 南関東における示標テフラに含まれる強磁性鉱物の TiO_2 含有量

の同定の可能性を調べた。この際、 TiO_2 量 15.00% の KIP 12 をはじめとするグループ分けの境界とした数値の $\pm 0.1\%$ の範囲を含有量とするテフラは、両方のグループに加えて検討した。

TiO_2 量が 14.0~14.6% の A グループでは TAm 4 と Kmp 1~4, KIP 3 と KIP 7, CCP 1 と CCP 2, CCP 2 と TCu 2-u の区別がやや難しい。 TiO_2 量が 14.4~15.1% の B グループでは TB 1-I と KIP 8, および KIP 12, 14.9~15.5% の C グループでは KIP 13-m と TB 6, OP と Kmp 7, および KIP 2, TAm 7 と TAm 3, および TCu 2-I, Kmp 9 と TAm 1Pf などの区別は、程度の差はあるが難しい。

そこで、さらにこれらのテフラを一括して V/Mn と Ti/Zn の組合せとして図 5 にまとめた。その結果、多くのテフラは区別がつくようになった。しかし、この組合せでも TB 1-I, KIP 8, および KIP 12 と, OP, Kmp 7, および KIP 2 の 2 グループのそれぞれのテフラの区別は不可能である。しかし、これらも表 2 に示したように Fe-Ti 酸化鉱物の含有率などを用いることに

表 2 鉄-チタン酸化鉱物の含有率と付着率

テフラ名	チタン磁鉄鉱の含有率 (wt%)	チタン鉄鉱の含有率*	付着率 (wt%)
KIP 8	1.2~1.5	F~E	66.3~68.9
12	0.55	C	54.8
TB 11	0.59	A	69.4
OP	0.36~0.39	D	55.7~64.3
Kmp 71	0.6	E	57.7
KIP 2	1.5	B	50.8

* : 方法 (3) 参照

よって、区別は容易につくようになる。

2) チタン磁鉄鉱の TiO_2 含量と斜方輝石の屈折率との関連

β 相の主成分である TiO_2 量が母岩の岩質と大きな関連のあることは、岩崎・桂 (1950), BUDDINGTON and LINDUSLEY (1964) などによって明らかにされている。すなわち BUDDINGTON らによると、一般的には玄武岩の β 相は TiO_2 mol% で 25 前後、輝石安山岩で 15

4-1: A グループ (TiO₂ 含有量 14.0~14.6 mol %) 4-2: B グループ (TiO₂ 含有量 14.4~15.1 mol %) 4-3: C グループ (TiO₂ 含有量 14.9~15.5 mol %)

前後、流紋岩で6前後というように、母岩が異なると明瞭にβ相の化学組成が変わる。このことは、図3に示すように箱根火山の両輝石安山岩質テフラはTiO₂量が14.0~15.5 mol%のものが最も多く、含角閃石テフラのβ相は7 mol%前後のものが多く、よく一致している。

一方、斜方輝石のEn:Fsの比の値が屈折率を決定する。斜方輝石のFsと屈折率の間には、正の相関のあることが知られている(KUNO, 1954)。

7) ここでは、酸化鉄成分の意味で使用した。

図4 強磁性鉱物のMn/FeとV/Tiの組合せによるテフラの区別

大磯丘陵の示標テフラについて、町田ほか(1974)、新井ほか(1977)の斜方輝石の屈折率の結果を用い、これと同一のテフラに共存するβ相のTiO₂量との相互関係を図6に示した。それによると両者は正の相関関係を明瞭に示している。

斜方輝石の屈折率が大きくなることはFs比が大きくなるので、斜方輝石のMgO成分に対してFeO⁷⁾成分が増加する。したがってβ相のTiO₂量と斜方輝石の屈折率が正の相関を示すことは、斜方輝石とβ相のFeO

図 5 強磁性鉱物の V/Mn と Ti/Zn の組合わせによるテフラの区別

図 6 チタン磁鉄鉱の TiO_2 含有量と斜方輝石の屈折率との関係

○ : bimodal な γ 特性を示す斜方輝石の平均値
 × : 角閃石テフラで β 相のみの試料
 ● : その他の試料
 斜方輝石屈折率はすべて、町田ら (1974), 新井ら (1977) による。

成分の量は逆比例の関係にあることになる。この一見矛盾する事実は次のように解釈することで説明がつく。

すなわち、マグマの化学組成が一定であると仮定した場合、斜方輝石と β 相がほぼ同時に晶出するとき、本研

究で得られた結果ではマグマ中の Fe は β 相よりも輝石に、より濃縮され易い傾向にあることを示している。従って、Fs 比の大きな斜方輝石が晶出する場合は Fe イオンが斜方輝石に、より消費されるので (同時に晶出

図 7 強磁性鉱物の含有率と TiO_2 含有量の関係

● : 両輝石テフラ, × : 角閃石テフラ

る β 相は) 相対的に TiO_2 量が大きなものになることが推定される。

3) 強磁性鉱物の TiO_2 量とその含有率, および付着率との相互関係

箱根火山の両輝石テフラの強磁性鉱物の含有率が 1.0 % 以内の試料は, TiO_2 量と含有率の間には明瞭ではないが図 7 のように負の相関関係が認められる。一方, 含有率が 1~2% では両者は逆に正の相関関係を示すが, 含有率がさらに大きくなると両者の間には一定の傾向が認められなくなるなど, 強磁性鉱物の含有率と TiO_2 量の間の関係はやや複雑な変化を示す。

箱根火山を給源とする, 21 枚のやや厚いテフラを対象として, 単層内の下部から上部にかけての TiO_2 量, 強磁性鉱物含有量, および付着率の変化の様子を単純化して図 8 に示した。図 8 によれば TiO_2 量と強磁性鉱物含有率の間の関係が, 負の相関傾向を示すテフラは目立って多く 12 枚であり, 正の相関傾向を示すテフラは 6 枚と少ない。含有率と付着率が負の相関傾向を示すテフラは 10 枚, 正の相関傾向を示すテフラは 8 枚である。 TiO_2 量と付着率が正の相関傾向を示すテフラは 9 枚, 負の相関傾向を示すテフラは 9 枚である。したがって, 強磁性鉱物の含有率と付着率, および TiO_2 量と付着

率の間には明瞭な相関傾向は認められない。

強磁性鉱物の TiO_2 量と含有率について, 箱根火山のテフラ全体としてみた場合は, 図 7 のように負の相関傾向が認められる。またこの両者については単層内でも負の相関傾向を示すテフラが多い。しかし, 一部には逆に正の相関傾向を示すテフラもある。

TiO_2 量と付着率は, 図 9 に示すようにテフラ全体としてみた場合, 正の相関傾向を示す。しかし, 単層内ではこの関係が不明確である。単層内では強磁性鉱物の含有率や TiO_2 量, および付着率のそれぞれの 2 つの組合わせによる相関傾向が, テフラの種類によって逆の関係を示す試料もある。これらは, マグマから β 相が晶出する際のマグマの物理的, 化学的条件などの違いによるものと考えるが, III 結果と考察 (1)~(3) とかわかりをもつ, 残された問題である。

IV. 結 論

1) 従来, テフラの特性記載の一項目である重鉱物組成は, Fe-Ti 酸化鉱物を一括して磁鉄鉱として扱っている。本報文では, この鉱物を α , β 両相に別けてそれぞれの含有率を調べた。 α , β 両相の存在状態や, 磁石につく鉱物全体に対する Host 鉱物の含有率を付着率と

テフラ名	TiO ₂ 量(mol%)	強磁性鉱物の含有量(wt%)	付着率(wt%)	テフラ名	TiO ₂ 量(mol%)	強磁性鉱物の含有量(wt%)	付着率(wt%)	テフラ名	TiO ₂ 量(mol%)	強磁性鉱物の含有量(wt%)	付着率(wt%)
TP				KIP8				TAm4			
OP				KIP7				TAm1			
KmP7				KIP6				TAI 3			
KmP6				TAu12				TB 8			
KmP5				TAu 6				TB 7			
KmP1				TAm 7				TB 1			
KIP13				TAm5				TCu 1			

図 8 示標テフラの単層内における強磁性鉱物の TiO₂ 量と含有率および付着率の変化傾向

名づけて調べた。これらの結果は示標テフラの特性の一つとして、テフラの同定にも役立つことを示した。

2) 南関東の示標層約 75 枚について、含まれる強磁性鉱物の TiO_2 量による、テフラの区別を試みた。 TiO_2 量が類似する試料は、強磁性鉱物の Mn/Fe と V/Ti 、さらには V/Mn と Ti/Zn の元素比の組合せ法により、ほとんどテフラは区別ができた。これらの特徴でも区別のできない試料は、1) に示した岩石記載学的な特性により区別のできることを示した。

3) 共存する斜方輝石の屈折率と β 相の TiO_2 量の間には正の相関があることを示した。その原因は、マグマから両鉱物がほぼ同時に晶出するときは、鉄は斜方輝石に、より濃縮され易いために生ずるものと考察された。

4) 箱根火山を給源とするテフラの強磁性鉱物の含有率と付着率には正の相関関係が認められる。ただし、この関係は含有率 1% 前後を境いにやや異なる。含有率の大きなテフラは、強磁性鉱物が比較的初期から晶出が行われたのに対して、含有率の小さなテフラの強磁性鉱物は、噴出直前に近い時期から晶出したと考えると、強磁性鉱物の含有率と付着率が正の相関関係を持つことは説明がつく。示標テフラの単層内における下部から上部にかけての、強磁性鉱物の含有率の変化と付着率の変化の傾向は、テフラの種類によって異なった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、東京工業大学の岩崎岩次、桂敬両名誉教授、小坂丈予教授、吉田 稔助教授、北山憲三博士、埼玉大学の小沢竹次郎教授には、終始指導と鞭撻、ならびに種々の便宜をいただいた。また、東京都立大学の町田 洋教授には層序や試料の採集場所について直接現地で指導を仰いだ。東京大学・海洋研の古田俊夫氏には論文を読んでいただき、有益な助言を数多くいただいた。平塚市博物館の森 慎一氏、大涌谷自然科学館の袴田和夫氏には試料の採集にあたって教示を、また、宮崎中学校の石渡喜市郎氏、創造教育センターの正岡榮治氏には試料の採集について多大の便宜をいただいた。

Mn , Zn の原子吸光分析について横浜国立大学の並木博教授をはじめ、村山治太氏、中村栄子氏に指導をうけた。これらの方々に心から感謝の意をあらわしたい。

引用文献

- 青柳隆二 (1970) 関東ロームの地球化学的研究 (軽石に含まれる強磁性鉱物の一般的性質). 地球科学, **24**, p. 1—17.
- 青柳隆二 (1983) 強磁性鉱物の主成分によるテフラの同定の基礎的研究. 地球化学, **17**, p. 109—117.
- 青柳隆二 (1985) 強磁性鉱物中の微量成分によるテフラの同定法. 地球化学 (投稿中)
- 新井房夫 (1972) 斜方輝石、角閃石の屈折率によるテフラの同定—テフロクロロジーの基礎的研究—, 第四紀研究, **11**, p. 254—269.
- 新井房夫・町田 洋・杉原重夫 (1977) 南関東における後期更新世の示標テフラ層。一特性記載とそれに関連する諸問題—, 第四紀研究, **16**, p. 19—40.
- BUDDINGTON, A. F. and D. H. LINDSLEY (1964) Iron-titanium Oxide minerals and Synthetic equivalents. *Jour. Petro.*, **5**, p. 310—357
- 平塚市博物館資料 (1980) 大磯丘陵の地質 1. 平塚市博物館資料 no. 24.
- 岩崎岩次・桂 敬 (1950) 火山岩中の所謂磁鉄鉱 (磁石に引かれる造岩鉱物) の化学組成とその母岩の岩漿の時期. 九州鉱山学会誌, **18**, p. 197—203; p. 256—259; p. 291—295.
- 関東ローム研究グループ (1965) 関東ローム—その起原と性状—. 378 p; p. 51—61. 築地書館
- KUNO, H (1954) Study of orthopyroxenes from volcanic rocks. *Amer. Min.*, **39**, p. 30—46
- 町田 洋・森山昭雄 (1968) 大磯丘陵の Tephrochronology とそれにもとづく富士および箱根火山の活動史. 地理評, **41**, p. 241—257
- 町田 洋 (1971) 南関東のテフロクロロジー (1). 第四紀研究, **10**, p. 1—20.
- 町田 洋・新井房夫・村田明美・袴田和夫 (1974) 南関東における第四紀中期のテフラの対比とそれに基づく編年. 地学雑, **83**, p. 302—338.
- 中村一明・荒牧重雄・村井 勇 (1963) 火山の噴火と堆積物の性質. 第四紀研究 **3**, p. 13—30.
- 大島 治 (1975) 噴火現象の Mineralogy, 火山 (第二集), **20**, (特別号), p. 275—298.
- 上杉 陽 (1976) 大磯丘陵のテフラ. 関東の四紀. no. **3**, p. 28—38.