

# 翻 訳

地質調査所月報, 第32巻 第11号, p. 683-691, 1981

552.3 : 550.4(510)

## 湖北省廟垭<sup>ミアオヤ</sup>カーボナタイトの地球化学的特徴とその成因の研究\*

李<sup>リー</sup> 石<sup>シ</sup>\* (湖北省地質実験室)

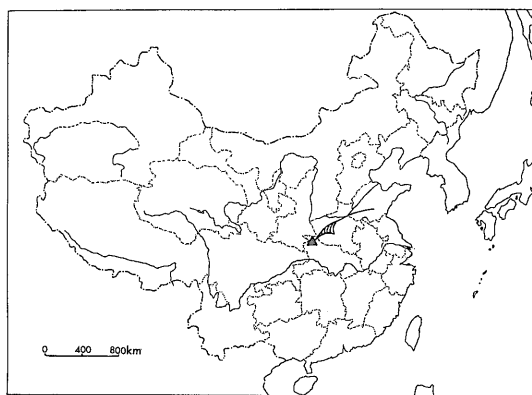
岸 本 文 男\*\*訳

### 1. 地質の概況

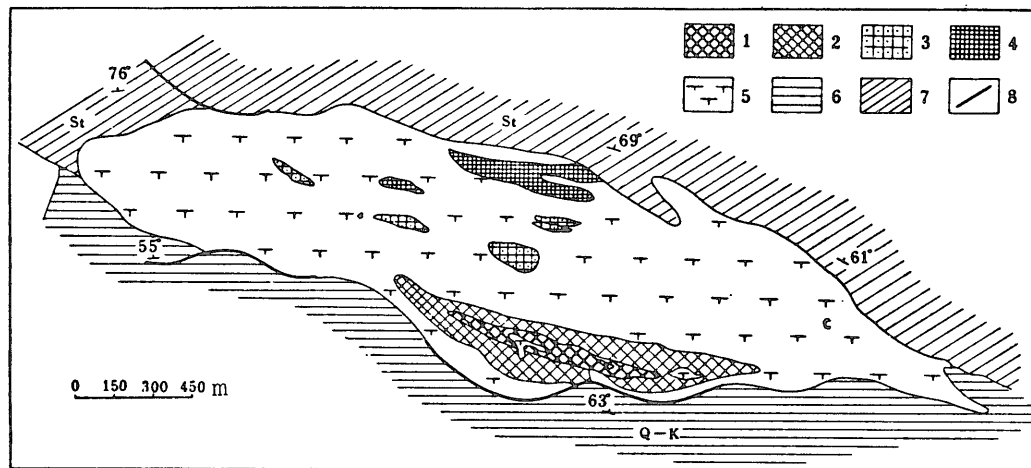
本地区のカーボナタイトは秦嶺<sup>チンリン</sup>山脈に平行する褶曲帯<sup>ウータン</sup>の東南部, 武当地塊の西縁部にあつて, 第1オードの複背斜の軸部に近い東北翼に位置する. 本地区内における構造破碎帯, 断裂帯はかなり発達し, 線状褶曲が明瞭で, 構造線の方向はNW-SE, 傾斜はNEである.

地区内に露出する主な地層は震旦系下部統<sup>ヤオリンホ</sup>の耀令河層群の海成・弱変成火山岩系で, 主として石英ケラトファィアとスピライトからなる. カンブリア系下部統の炭質絹雲母片岩がそれに次ぐ. そのほかに, 閃長岩, 霞石

閃長岩, 石英-アルカリ閃長岩などの浅成貫入岩体とその岩脈が露出する.



第1図 廟垭カーボナタイトの位置図 (▲印)



第2図 廟垭カーボナタイト複合岩体地質概要図

- |                 |              |                |
|-----------------|--------------|----------------|
| 1—黒雲母カーボナタイト    | 2—方解石カーボナタイト | 3—含炭方解石カーボナタイト |
| 4—アンケライトカーボナタイト | 5—閃長岩        | 6—メタ石英ケラトファィア  |
| 7—炭質絹雲母片岩       | 8—断層         |                |

カーボナタイトと閃長岩(成分上はアルカリ閃長岩に相当)は複合岩体を構成し、炭質絹雲母片岩と石英ケラトファィアーの間の構造弱帯にそって分布する。その平面形態は一体の細長いレンズ状を呈し(第2図),その長軸の方向と地域の構造線の方向は基本的に一致する。

2. カーボナタイトのタイプと生成段階

主要鉱物構成に基づいて、このカーボナタイトは以下の4種のタイプに分けられる。

(1) 黒雲母カーボナタイト(sovite)

このタイプのカーボナタイトの露出面積は大きくなく、前記複合岩体の南部に分布し、主として方解石と黒雲母、燐灰石からなり、コロンバイト、ニオブ金紅石、モナズ石などのニオブ・希土類鉱物を含有している。このタイプのカーボナタイトは一般に灰白色を呈し、通常、塊状構造を示すが、方解石と黒雲母が互いに間をおいて分布するときには、不鮮明な縞状構造をつくることがある。このカーボナタイトは半自形・粒状組織を備え、粒度はおおむね0.5-1mmである。

その方解石は劈開と双晶紋が比較的良好に発達し、その劈開中に苦灰石の微細な容晶がみられることもある。この方解石の化学組成は第1表に掲げた通りで、この表で明らかなように、この方解石はMg, Fe, Mnなどの置換元素の含有率が非常に低いが、一定量のSrとBa、ごく少量のNbと希土類元素を含有している。これらの元素は方解石の結晶格子に入り、またCaの類質同像混合物をつくっている。

黒雲母含有率は一般に3%以上で、その大半は褐色であるが、褐緑色を呈するものもある。その多色性はいちじるしく、Ng・Nmが濃褐色、Npが淡褐色、Ng= Nm=1.652である。鱗片の大きさは大小さまざまで、大きいものは数mm、小さいものは0.1mm以下である。この黒雲母の化学組成は第2表に掲げた通りで、この表で明らかなように、黒雲母中のFeがMgよりもはるかに多く、同時にTiの含有率も比較的高い。一定量のNb

を含有する点は、Tiを置換することによって生じた現象であろう。

燐灰石含有率はおよそ1-5%で、その燐灰石の大部分は半自形・柱粒状を示し、粒度は約0.2-1mm, Ne=1.633, No=1.637である。結晶の稜角は一般にまろく、溶食現象が認められることもある。このような現象は、その燐灰石が方解石よりも前に晶出したためと説明できる。これらの燐灰石の化学組成は第3表に示した通りであるが、この表で明らかなように、これらの燐灰石は弗素燐灰石に属する。塩素と二酸化炭素の含有率はきわめて低いが、一定量のSrと希土類が含有されている。このような特徴は、アフリカの黒雲母カーボナタイト(sovite)<sup>[1]</sup>中の燐灰石と非常によく似ている。

コロンバイトは、通常、ニオブ金紅石よりも多く含まれ、多くは八面体、一部は板柱状を呈する。交叉ニコル下での反射によれば、八面体のものでは多くの異なる消光位が現われる。これは、その八面体がコロンバイトの単体でなく、多くのコロンバイトの小結晶の集合からなることを示している。では、それがなぜ八面体を呈するのか? もともとこれはパイロクロアを交代してできたもので、その交代作用が比較的徹底し、そのコロンバイト仮像の核の部分にパイロクロアの残晶がときには認められることもある。

このコロンバイトの化学組成は第4表に示してあるが、この表で明らかなように、Taの含有率が比較的低く、Nb/Ta=46で、Ti含有率が比較的高く、一定量の希土類とウラン、トリウムを含んでいる。

(2) 方解石カーボナタイト(alvikite)

これは主として複合岩体の南部に分布し、露出面積が比較的広く、黒雲母カーボナタイトと密接に共存し、両者は漸移関係を有する。このカーボナタイトと黒雲母カーボナタイトとの主な違いは、前者の黒雲母含有率が低く(<3%),ときには前者が全く黒雲母を欠いていることである。コロンバイト、ニオブ金紅石、モナズ石の含有率も相対的に低いが、ニオブ金紅石がコロンバイトよ

第1表 方解石の化学組成(%)

試料番号	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	FeO	MnO	CO <sub>2</sub>	BaO	SrO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ΣRE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ZK6-3	0.51	54.62	0.02	0.63	0.39	43.08	0.03	0.77	0.003	0.100

第2表 黒雲母の化学組成(%)

試料番号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	F	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
ZK5-4	38.62	13.78	18.50	4.78	6.93	4.18	9.05	0.16	4.85	0.85	0.211

第3表 磷灰石の化学組成の比較

重量 % 成分	試料採取点	廟垣地区黒雲母カーボナタイト (ZK5-4)	タンザニア共和国 モビーア Sovite	ケニア共和国 レンガイ Sovite	ジンバブエ共和国 ツオロフ Sovite
CaO		52.92	54.09	55.01	55.90
MgO		0.77	0.45	0.21	0.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.28	0.06	0.03	0.07
SrO		0.91	0.65	0.52	0.38
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.26	0.34	0.18	
ZrO <sub>2</sub>			0.11	0.09	0.04
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.13			
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0.04			
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0.012			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		42.20	41.47	40.76	40.19
CO <sub>2</sub>		0.62	0.43	0.34	0.74
Cl		0.005			
F		2.99	2.84	3.10	2.60
H <sub>2</sub> O			0.29	0.12	0.30
-O=F <sub>2</sub>		1.26	1.09	1.30	1.06
計		99.99	99.64	99.07	99.24

注：タンザニア，ケニア，ジンバブエの場合は，文献 [1] から引用

第4表 コロンバイトの化学組成 (%)

試料番号	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	ThO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	ΣRE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Z <sub>11</sub>	70.60	1.54	4.46	1.22	13.10	4.57	0.62	0.13	1.12	0.40	1.84

りも多い場合もある。

### (3) 含炭方解石カーボナタイト

(carbon-bearing alvikite)

これは複合岩体中に多くみられるカーボナタイトであるが，露出面積はいずれも広くなく，常に不規則脈状ないしこぶ状の小岩体を形づくっている。その幅は数mから数10mで，延長は長くない。主として，複合岩体の中中部と北部に分布する。

岩石としては緻密塊状で，粒度は一般に0.5 mm以下，主として方解石，部分的にアンケライトからなる。方解石は他形・粒状を示し，顆粒中もしくは粒間に普遍的に炭質物を含み，そのためこの岩石は灰黒色を呈する。アンケライトと方解石は互に入りくみ，あるいはアンケライトが方解石の割れ目中に存在し，ときにはアンケライトが網状ないし樹枝状に方解石を交代していることもある。主なニオブ・稀土類鉱物はニオブ金紅石，コロンバイト，モナズ石，バストネサイト，パイサイトなどである。

### (4) アンケライトカーボナタイト

(ankeritic carbonatite)

これは主として複合岩体の北部に分布し，それぞれの平面積は大きくない。多くは不規則こぶ状ないし脈状を呈し，閃長岩中に胚胎されている。

岩石としては灰褐色，緻密塊状で，アンケライトと少量の方解石で構成されている。アンケライトは他形粒状を示し，粒度は一般に0.1-0.5 mm，劈開と双晶が発達せず，顆粒中に常に小さなモナズ石ないし稀土類弗素炭酸塩鉱物が包有され，炭質包有物が認められることもある。アンケライトは Ne=1.550，No=1.751で，その化学組成は第5表に掲げた通りである。この表から明らかなように，アンケライト中の Fe と Mg の含有率はほぼ等しく，Mn の含有率はきわめて高く，同時に一定量の Sr と稀土類を含有している。化学組成からみると，この種のアンケライトは苦土アンケライトに属する。主なニオブ・稀土類鉱物はバストネサイト，パリサイト，モナズ石及びニオブ金紅石，コロンバイトなどである。

上述の4種のカーボナタイトは，野外観察と室内研究の結果から，その形成順序によって大体次の3段階のものに分けることができる。

a) 前期 黒雲母-方解石段階：大量の方解石と一定

第5表 アンケライトの化学組成(%)

成分 試料番号	CaO	MgO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	CO <sub>2</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO
27-Z <sub>3</sub>	28.28	11.46	10.81	0.25	4.80	43.12	0.39	0.21

第6表 カーボナタイトの化学組成

	黒雲母カーボナタイト (%)		方解石カーボナタイト (%)		含炭方解石 カーボナ タイト (%)	アンケライト カーボナタイト (%)	
	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	6.47	2.36	2.41	1.30	4.23	4.57	0.36
TiO <sub>2</sub>	0.21	0.16	0.18		0.11	0.16	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.18	1.26	0.69	0.76	1.67	2.10	0.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.27	2.58	2.21	3.43	1.85	2.18	0.61
FeO	1.97	2.04	1.60	0.90	2.55	7.43	7.11
MnO	0.40	0.27	0.43	0.47	1.35	2.02	0.99
MgO	0.83	2.66	0.66	1.60	1.23	10.61	13.70
CaO	45.61	47.87	50.11	47.91	45.13	27.12	31.43
Na <sub>2</sub> O	0.25	0.30	0.19	0.09	0.19	0.26	0.05
K <sub>2</sub> O	1.18		0.30		0.39		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.26	3.63	1.86	2.97	0.70	1.75	1.62
CO <sub>2</sub>	34.70	35.58	39.21	37.99	36.68	36.36	41.13
BaO	0.07		0.03		0.05	0.11	
SrO	0.88		1.12		0.30	0.21	
S	0.50		0.27		0.51	0.45	
H <sub>2</sub> O	0.42	0.13	0.43	0.64	0.93	0.92	0.32
炭質物	0.22		0.13		1.22	0.52	
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.252		0.046		0.122	0.052	
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.145		0.107		1.218*	2.922*	
計	100.60	98.84	101.95	98.84	100.35	100.11	98.12

1-廟埤地区4試料の平均 3-廟埤地区6試料の平均 5-廟埤地区4試料の平均 6-廟埤地区5試料の平均

2, 4, 7-金茲堡による世界の当該カーボナタイトの平均値

\* -Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

量の黒雲母・燐灰石が出現し、黒雲母カーボナタイトと方解石カーボナタイトが形成された。

b) 中期 アンケライト-方解石段階：大量の方解石が出現したほか、一定量のアンケライトも晶出して含炭方解石カーボナタイトを形成しながら、それが方解石カーボナタイトに貫入した。この段階では、黒雲母と燐灰石の含有率がきわめて低く、モナズ石と稀土類弗素炭酸塩鉱物が出現した。

c) 後期 アンケライト段階：アンケライトが網状ないし樹枝状に含炭方解石カーボナタイトを交代し、アンケライトカーボナタイトがもっとも後期の産物であることを示している。この段階では、黒雲母と燐灰石が全く生成されず、稀土類弗素炭酸塩鉱物とモナズ石の含有率

が著しく高い。

### 3. 地球化学的特徴

廟埤地区の4種のカーボナタイトの化学組成は第6表に示す通りであるが、この表で明らかのように、この4種のカーボナタイトと世界の同じタイプのカーボナタイトは基本的に酷似し、少し違っているのは廟埤地区の場合にSi, Al, K, Naがやや多いことである。それは、廟埤地区のカーボナタイトが一定量の閃長岩の残留成分を含んでいるためである。

廟埤地区の4種のカーボナタイトの平均化学組成とゴールド(D. P. Gold, 1963)の統計による世界のカーボナタイト及び世界の堆積炭酸塩岩の平均化学組成を比較

第7表 カーボナタイト化学組成の比較表

	世界の堆積炭酸塩岩の平均値 <sup>2)</sup> (%)	世界のカーボナタイトの平均値 <sup>3)</sup> (%)	廟垣地区カーボナタイトの平均値 <sup>1)</sup> (%)
SiO <sub>2</sub>	5.14	9.58	4.42
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.65	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	2.90	1.66
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.49	4.33	1.88
FeO		4.37	3.39
MnO	0.14	0.72	1.06
MgO	7.79	6.69	3.33
CaO	42.30	34.02	41.99
Na <sub>2</sub> O	0.03	1.02	0.22
K <sub>2</sub> O	0.16	1.47	0.57
BaO	0.001	0.40	0.08
SrO	0.07	0.81	0.63
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	1.86	1.64
CO <sub>2</sub>	41.74	29.29	36.43
H <sub>2</sub> O	1.63	1.32	0.70
Nb <sup>2)</sup>	0.00002	0.080	0.084
Ce	0.0012	0.1505	0.6740

- 1) 4タイプのカーボナタイトの平均
- 2) Nb+Ta
- 3) E. Wm. Heinrich (1966): The geology of carbonatites: Chicago

すると（第7表）、廟垣地区のカーボナタイトには次のような特徴がある。

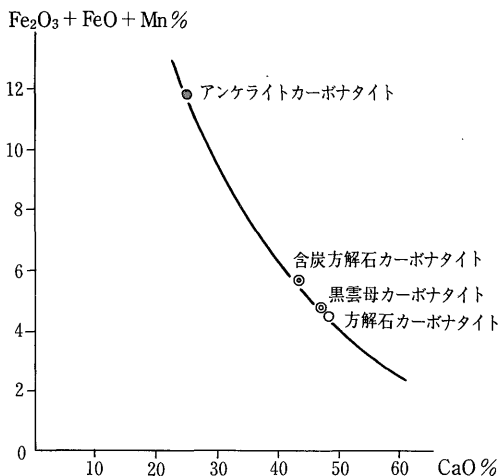
a) Al, Na, K の含有率が世界の堆積炭酸塩岩の場合よりも明らかに高く、世界のカーボナタイトの場合に酷似する。

b) Fe, Mn, P, Sr, Ba, Nb, RE などの元素含有率が世界のカーボナタイトの場合に類似し、世界の堆積炭酸塩岩の場合よりもはるかに高い。

このように、岩石の化学組成からみると、廟垣地区のカーボナタイトと世界のカーボナタイトが備えている特徴点は基本的に一致し、堆積炭酸塩岩とは明瞭な違いがある。

以下、廟垣地区のカーボナタイトの3期の生成段階のもの（前期の黒雲母カーボナタイトと方解石カーボナタイトから中期の含炭方解石カーボナタイトを経て後期のアンケライトカーボナタイトにいたる）について、その2・3の元素の地球化学的進化の特徴を検討する。

a) 前期から後期に向って、当該カーボナタイトの主要造岩元素である Ca の含有率が下がり、Fe と Mn の含有率が次第に高くなり、これらは明瞭な反比例関係にある（第3図）。Mg も Fe, Mn と同じような変化傾向を示し、後期になるほど含有率が著増する。Wyllie と

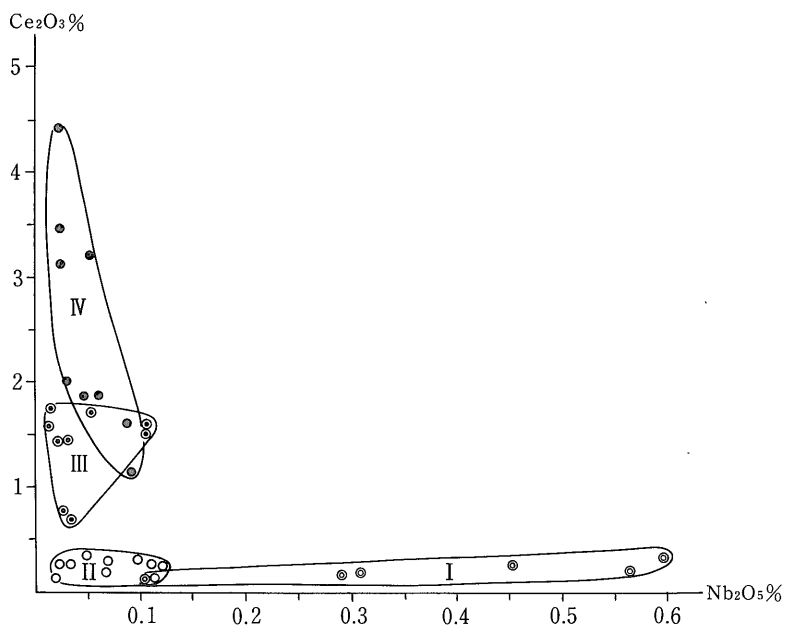


第3図 CaO と Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO+Mn の反比例関係

Tuttle (1959, 1960, 1965, 1966) は CaO—CO<sub>2</sub>—H<sub>2</sub>O 系の等圧・加熱実験を繰り返して、メルト中の例えば Fe, Mn, Mg が増加するときにはメルトの晶出温度が下がることを発見した。廟垣地区のアンケライトカーボナタイト中の Fe, Mn, Mg の含有率が比較的高く、したがってその晶出温度は当然低いはずで、この種のカーボナタイトが後期段階に形成されたのもそのためである。

b) ニオブは主として前期に濃集し、とくに黒雲母カーボナタイトで含有率が最大となる（第4図）。中期・後期のものでは、Nb 含有率が漸減する。ニオブ鉱物について言えば、前期の段階のものは種類が複雑で、大量のコロンバイト、ニオブ金紅石の晶出のほか、パイロクロア、フェルスマイト、プライオライトなどがみられる。後期になると、ニオブ鉱物の種類が少なくなる傾向を示し、コロンバイトとニオブ金紅石の2種だけとなる。ニオブ鉱物の含有率からみると、前期の段階はコロンバイトが主で、とくに黒雲母カーボナタイト中ではコロンバイトの含有率が非常に大きく、鉱石鉱物量の94.1%に達している。しかし、後期の段階のアンケライトカーボナタイト中では、コロンバイト含有率が明らかに低くなっており、鉱石鉱物量の50%よりも少なく、ニオブの大部分はニオブ金紅石の形をとっている。

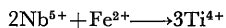
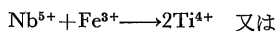
ニオブのこのような挙動の特徴は、一つには、ニオブとチタンが共通した地球化学的性質を備え、ニオブ鉱物の晶出がチタンによる規制を受けやすいことによる。前期段階の黒雲母カーボナタイトでは、黒雲母を形づくる上で必要なため、チタンの大部分が黒雲母の結晶格子中に入り、鉱液中のチタンが大きく減少し、大量のニオブを含んだチタン鉱物（ニオブ金紅石）を作る力がなくなり、そのためニオブは比較的少量の独立ニオブ鉱物（主



第4図 4種のカーボナタイトの Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含有率と Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有率の変化図

- I—黒雲母カーボナタイト
- II—方解石カーボナタイト
- III—含炭方解石カーボナタイト
- IV—アンケライトカーボナタイト

としてコロンバイト)を晶出することになる。しかし、後期段階になると、黒雲母が欠除するため、チタンは分散され難く、鉍液中のチタン濃度は比較的高く、Ti/Nb値はたえず増大し、ニオブの大部分がチタンに規制されて金紅石の結晶格子に入りこみ、ニオブ金紅石を形づくる。その方式は次の通りである。

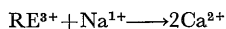


また一つには、カーボナタイトが晶出する過程では方解石がたえず減少しつづけ、アンケライトがたえず増大しつづけるため、鉍液の酸度が次第に高くなり、コロンバイトの溶解度が大きくなっていく。アンケライトカーボナタイト中には、コロンバイトの激しい溶食現象がごく普遍的に認められる。そのため、かなりのニオブがコロンバイトの溶解によって失なわれ、同時にコロンバイト含有率もはっきり低下する。しかし、この過程はニオブ金紅石の場合と全く異なる。ニオブ金紅石はきわめて安定し、酸度の上昇がニオブ金紅石に与える影響はきわめて小さく、そのため、ニオブ金紅石とコロンバイトを比較すれば、前者の方が後期段階での含有率は相対的に高くなる。

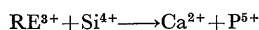
c) 第4図からみると、稀土類元素の濃集の法則性と

ニオブのそれは相反し、稀土類の含有率は前期では低く、後期で高くなっている。稀土類鉍物の種類でいえば、ニオブ鉍物の場合と異なり、それは前期では比較的簡単で、少量のモナズ石のみみられるだけである。中期及び後期のカーボナタイトになると、稀土類鉍物の種類は次第に複雑になり、モナズ石のほか、多くの稀土類弗素炭酸塩鉍物、例えばバストネサイト、パリサイトなども出現している。

このような産状が生じた原因は、前期の黒雲母-方解石段階で鉍液の塩基度が高く、Ca<sup>2+</sup>イオンの濃度が大きく、Ca<sup>2+</sup>とRE<sup>3+</sup>のイオン半径が類似し(Ca<sup>2+</sup>=1.06 Å, RE<sup>3+</sup>=0.99-1.22 Å)、そのため多くの稀土類元素がカルシウム鉍物の結晶格子に入り、方解石と燐灰石中にすべて一定量の稀土類元素が含まれてくることにある。方解石中において、稀土類元素がカルシウムを置換する方式は、次のように表わすことができる。



燐灰石の場合には、同時に珪素が燐を置換して電荷を補う。



これら2種の置換方式は一定条件の制限を受けるため、無限に進行することができず、そのため主として前

期では稀土類が広く分散するが、当該カーボナタイト中の稀土類含有率は高くない。同時に、この段階では、比較的多くの  $P^{6+}$  が存在するが、しかし  $Ca^{2+}$  の濃度が非常に高いため、 $P^{5+}$  はすべて  $Ca^{2+}$  と結合し、燐灰石を形づくる上での必要を優先的にみだし、ごく少量の  $P^{5+}$  が  $RE^{3+}$  と結合してモナズ石を形成するにすぎない。これが、どうして前期のカーボナタイトは稀土類に乏しく、モナズ石の含有率も低いかという理由である。中期と後期の段階になると、アンケライトが大量に出現し、鉱液の塩基度が下がり、 $Ca^{2+}$  と  $P^{5+}$  が前期の段階で比較的多く消耗されるため、両イオンの濃度がはっきりと低下し、それと同時に稀土類の濃度がたえず増大して、稀土類の  $P^{5+}$  を奪う能力が次第に  $Ca^{2+}$  よりも大きくなり、そのため燐は稀土燐酸塩 (モナズ石) の形で出現し、燐灰石の形をとらなくなる。そのほか、中期と後期の段階に入ると、弗素の濃度はたえず上昇して螢石が広く発達し、その際に弗素は稀土類の沈殿に非常に大きな影響を与え、大量の稀土類弗素炭酸塩の晶出を促進して、多くのバストネサイトとパリサイトを つくる。

d) 上記4種のカーボナタイト中には、それぞれ一定量のストロンチウムとバリウムが含有され、ストロンチウム含有率がバリウム含有率よりも高いことは一つの特徴点となっている。ストロンチウムについて言えば、前期の段階から後期の段階へその含有率が次第に低下している。この種の法則的な変化は、各段階のカーボナタイトの生成温度と関係があるらしい。フェーブル (Faivre, 1946) は Ca-Sr 炭酸塩の合成過程で、温度上昇の環境下においては Ca-Sr の類質同像置換が強まることを発見した。また、ラッセル (H. D. Russel, 1954) らは東トランスバール<sup>1)</sup>のカーボナタイトを研究して、方解石が高温条件下にあると、低温条件下にある場合よりも多くのストロンチウムをとりこむと指摘している。方解石の Sr 含有率 (第1表) とアンケライトの Sr 含有率 (第5表) はフェーブルとラッセルの見解が正しいことを証明している。前期の黒雲母-方解石段階は温度がもっとも高く、そのため、その方解石は比較的多量のストロンチウムを含んでいる。後期のアンケライト段階になると、温度は下って最低となり、そのため、アンケライトの Sr 含有率ははっきりと下がっている。バリウムについていえば、その変化は一般に小さく、前期から後期まで基本的には一定の状態を保っている。

#### 4. カーボナタイトの成因

カーボナタイトの成因は、かなり長期にわたって岩石

<sup>1)</sup> 原文では「東薩摩嶺」(東サヤン山脈)となっている。

学の一つの重要な研究課題となっている。また、カーボナタイトは稀金属鉱床 (とくにニオブ-稀土類鉱床) との関係が密接なため、最近特に人々の関心をよんでいる。

廟垣地区のカーボナタイトの岩石学的研究と地球化学的研究を通じて、筆者はカーボナタイトの成因問題に対し次のような見解に達している。

1. カーボナタイトの成因はマグマ生成体と関係があり、堆積成炭酸塩岩若しくは堆積変成炭酸塩岩が何らかの作用によって変化し、生成することは不可能である。

(1) カーボナタイトは岩株、岩脈、岩瘤の形で産出し、明らかに貫入岩の特徴を備えている。産状が絶対的な根拠にならないことは当然で、堆積成炭酸塩岩あるいは堆積変成炭酸塩岩が構造応力作用によって可塑状態になり、ある通路にそって上昇して、岩株、岩脈、岩瘤を形成することはありうるが、廟垣地区の深部が主として原生代の弱変成石英ケラトファィアからなり、堆積成炭酸塩岩ないし堆積変成炭酸塩岩が欠くので、そのような成因である可能性はない。

(2) 黒雲母が方解石と共生し、方解石が溶食されている。廟垣地区の広域変成状況からみると、黒雲母の出現は異常である。廟垣地区の変成岩は絹雲母-緑泥石-曹長石変成相で、黒雲母相の段階には達していないのである。したがって、黒雲母は堆積変成作用の産物ではないと考えられる。

(3) カーボナタイトの生成は多段階性を備え、各段階の鉱物組合せは多変性を有する。これは、堆積成炭酸塩岩ないし堆積変成炭酸塩岩の一般的な特徴と異なる。このごく小さな区域に炭酸塩岩が堆積したとしても、その炭酸塩岩の鉱物組成と化学組成にこれほど大きな違いが生じるとはとても考えられない。

(4) カーボナタイトの地球化学的特徴は世界の堆積成炭酸塩岩の地球化学的性質と全く異なり、マグマと成因的に関係があるカーボナタイトの特徴と非常によく似ている。

2. カーボナタイトを形づくった物質の起源は閃長岩質マグマと関係があり、閃長岩質マグマの晶出分化の残骸によって形成された可能性が大きい。

(1) 空間的にはカーボナタイトは閃長岩と密接に共存し、ときには閃長岩を交代した現象が認められる場合もある。カーボナタイト中に閃長岩の残体がみられることが多い。

(2) 時間的には、K-Ar 法を用いて閃長岩中の微斜長石 (251 m. y.) と黒雲母カーボナタイト中の黒雲母 (271 m. y.) の年代を測定した。前者の値が低すぎる原因は、微斜長石と黒雲母の Ar の保存力の差に関係がある。こ

の年代値から考えると、カーボナタイトと閃長岩の形成期は基本的に一致し、いずれもヘルシニア造山期の火成活動による生成体である。

(3) カーボナタイトと閃長岩はニオブ-稀土類鉱物の種類及び地球化学の面で非常によく似ており、Nb, Ce, La, Ti 及び Sr, Ba, Zr などが比較的多く濃集し、アルカリ岩特有の地球化学的特徴を備えている。カーボナタイトは閃長岩を基礎にして形成され、両者は継承発展の関係にある。したがって、ニオブ-稀土類元素ないし同鉱物の相対的富集度と複雑性の面では、両者で一定の差があらわれる。

(4) カーボナタイト-閃長岩複合岩体は長期にわたって安定していた武当地塊の縁辺に位置し、その部位はマグマの晶出分化に有利な条件をつくっていた。閃長岩の組成からみると、ほとんど単鉱物(カリ長石もしくは曹長石)からなり、暗色鉱物が認められず、マグマ分化作用が完全に進んだことをものがたっている。この種の閃長岩質マグマはすでに残漿の後期段階まで発展したものである。したがって、閃長岩のあとに形成されたカーボナタイトでは、それが残漿の晶出分化作用によって生じる熱水溶液から形成された可能性がある、とすべき理由もあるのである。

3. 閃長岩質残漿中にカーボナタイトの主成分のCaOとCO<sub>2</sub>があるのか、ないのか? CaOとCO<sub>2</sub>などの物質が閃長岩質残漿中に溶けるか、溶けないか? これはカーボナタイトの成因を検討する場合の鍵となる問題である。モーレイとフライシャー(Morey and Fleischer, 1940)及びミラー(Miller, 1952)らが行ったSiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>系とCaCO<sub>3</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O系の実験結果が明らかにしているように、CO<sub>2</sub>の圧力が増大する環境下では、CaO, K<sub>2</sub>O, SiO<sub>2</sub>の溶解度が温度の上昇にわたって大きくなる。ウィリーとタットル(Wyllie and Tuttle, 1959)は一連の実験を基礎にして、花崗岩質メルト中ではCO<sub>2</sub>の溶解度がきわめて小さいこと、アルカリ岩質マグマ中では炭酸塩の溶解度がかなり大きいことを発見し、この事実はカーボナタイトが花崗岩複合岩体に伴わず、ほとんど例外なくアルカリ岩体に伴われる、一つの重要な原因であるとしている。同時に、ウィリーとタットルは、結晶作用が進むにしたがってアルカリ岩メルト中に溶解するCO<sub>2</sub>量が多くなり、ついには正常なアルカリ岩メルトから炭酸塩溶液が分離・移動するようになる。実験結果に基づいて推測すれば、廟垣地区の閃長岩質残漿はきわめて標準的なアルカリ岩マグマではないが、アルカリ成分含有率が比較的高く、化学組成はアルカリ閃長岩に近い。そのため、この残漿は比較

的多くのCO<sub>2</sub>ないし炭酸塩を溶解することができ、閃長岩の晶出過程でそれを次第に濃集させ、閃長岩の生成にすぐ続いてカーボナタイトを形成するにいったと考えられる。

4. 廟垣地区のカーボナタイトの生成方式は充填が主体で、交代作用は副次的である。

(1) カーボナタイトが主として閃長岩を交代して生じたということであれば、閃長岩からもちだされたSi, Al, K, Naはどこにいったのだろうか? 世界には多くの、アルカリ岩を交代して生成したカーボナタイトがあり、そのカーボナタイトの近く、ないし周囲にはすべてフェナイトがみられるか、さもなければフェナイト化現象が生じ、Si, Al, K, Naなどの元素が所を得ているわけである。しかし、廟垣地区では、アルカリ岩複合岩体内でも、その付近でも、フェナイトないしフェナイト化現象が全く認められない。珪化現象もきわめて不鮮明である。したがって、交代作用を主体として生じたカーボナタイトである可能性は非常に小さい。当然のことながら、交代作用は行われ、確かにそれが認められることもあるが、その交代作用は火道ないし裂かの充填過程で副次的に生じたものにすぎない。

(2) 閃長岩質残漿から分化して生じた炭酸塩溶液は輝発成分が多く、粘性が非常に小さく〔4〕、内圧が比較的高いので、上昇が促進され、そのため一般にカーボナタイトの岩体はアルカリ岩複合岩体の頂部に賦存する。しかしながら、廟垣地区のカーボナタイトはそれと異なり、特に前期段階に形成された体積の比較的大きい黒雲母カーボナタイトと方解石カーボナタイトは、すべて、アルカリ岩複合岩体の下部に位置している。この問題はどのように解釈すべきであろうか? 我々は、閃長岩が形づくった後期の岩体では下部に構造破碎作用が働らき、深部で生じた炭酸塩溶液が構造弱帯を通過して上昇し、空隙を満たすことによって負の圧力をもたらし、それが当該複合岩体の下部に比較的大きなカーボナタイトの岩体を形成した、と解釈している。特に中期と後期の段階では、カーボナタイトの大部分が脈状を呈し、脈壁が一般に比較的鮮明で、明らかに裂か充填の特徴を備えている。

(3) ウィリー(Wyllie, 1966)〔5〕は実験結果に基づいて、次のような結論を導き出した。すなわち、カーボナタイトマグマから晶出したカーボナタイトの鉱物組成は、圧力と関係がある。圧力が低い場合には方解石に富んだカーボナタイトを形成し、圧力が増大した条件のもとでは苦灰石もしくはアンケライトが大量に晶出しやすい。このウィリーの実験データによると、アルカリ岩複



合岩体の下部には、方解石に富んだ、ほとんど苦灰石もしくはアンケライトを含まないカーボナタイトがある。それは圧力が高くない環境下で生じたものであり、圧力が高くない原因は当時の構造破碎作用がつくった空隙と関係づけることができよう。

## 5. 結 語

1. 廟垣地区のカーボナタイトは閃長岩と複合岩体を構成し、秦嶺山脈の東西性褶曲帯の東南端、武当地塊の西縁に位置する。この複合岩体は東西方向の断裂に規制され、ヘルシニア期のマグマ活動の産物である。

2. そのカーボナタイトは4種のタイプ、すなわち、黒雲母カーボナタイト、方解石カーボナタイト、含炭方解石カーボナタイト、アンケライトカーボナタイトに分けられる。これらのカーボナタイトが備えている岩石化学組成と地球化学的特徴は、マグマと関係のあるカーボナタイトの場合によく似ており、堆積成炭酸塩岩及び堆積変成炭酸塩岩との差はかなり大きい。

3. そのカーボナタイトの生成は、次の3段階に分けられる。

(1) 前期黒雲母カーボナタイト—方解石カーボナタイト段階

(2) 中期含炭方解石カーボナタイト段階

(3) 後期アンケライトカーボナタイト段階

これら各段階は、岩石生成条件、主要鉱物組合せ、構造・組織、岩体の産状を異にする面があるだけでなく、いくつかの元素に現われた地球化学的な特徴にも比較的大きな違いがある。

4. 各タイプのいずれのカーボナタイトもニオブとセリウム族希土類に富むのが特徴的で、タンタルとイットリウム族希土類の含有率はかなり低い。ニオブ含有率をもっとも高いのは黒雲母カーボナタイトで、主なニオブ鉱物はコロンバイトである。セリウム族希土類の含有率をもっとも高いのはアンケライトカーボナタイト、その主な希土類鉱物はバストネサイトとパリサイト、それに次ぐのがモナズ石である。

5. カーボナタイトの成因は閃長岩質マグマと関係があり、閃長岩質マグマの晶出分化作用によって生じた、カルシウムと二酸化炭素に富んだ熱水溶液が主として裂かを充填する方式で生じたものである。カーボナタイトが閃長岩と空間、時間、地球化学的性質などの点で密接に関係することは、いくつかの実験データによっても証明されている。

## 文 献

- [1] P. Prins (1973): Apatite from Africa carbonates: 《Lithos》, vol. 6, no. 2
- [2] 金茲堡 (1959): 稀有金属碳酸岩: 《稀有元素磁床地質》, 第1輯, 地質出版社
- [3] D. W. Hyndman (1972): Petrology of igneous and metamorphic rocks: New York
- [4] C. Barber (1974): Geochemistry of carbonates and related rocks from two carbonatite complexes, South Nyanza, Kenya: 《Lithos》, vol. 7, no. 1