

◇研究報告◇

高温酸化により形成された異常に Mgに富むカンラン石

—山口県萩市笠山火山の安山岩質スコリアの例—

機器分析センター 永尾隆志
山口県庁 蔵本（半田）正敏
島根大学 赤坂正秀
機器分析センター 森福洋二

1. はじめに

マグマは、噴出までの間に様々な環境に置かれる。普通マグマが経験する酸化状態は、石英-ファイアライト-マグネタイト (QFM) バッファー程度である。しかし、場合によっては、マグマがヘマタイト-マグネタイト (HM) バッファーのような高酸化状態になり、そのマグマから Mg や Fe³⁺ に富む鉱物が晶出することもある。あるいは、マグマが噴出したり固結した後で、高酸化状態におかれ、鉱物に oxidation symplectite が形成されたりする。

実際の岩石や鉱物がどのような酸化状態で形成されたかは、岩石や鉱物の組織、化学組成の特徴などによって推定される。

今回、萩市北方の笠山火山の赤褐色に酸化された安山岩質スコリアの中から異常に Mg に富むカンラン石が発見されたので、その成因について検討する。

2. 地質概説

笠山火山は、山口県萩市の北方に位置しており、阿武単成火山群の一部を構成している¹⁾。最近、角縁・永尾により笠山火山の安山岩の K-Ar 年代が測定され、数万年以内の値が得られた²⁾。従来、笠山火山については、何人かの研究者によって岩石学的な研究が行われている^{3) 4) 5) 6) 7)} が、半田の研究⁸⁾ が最も詳しい。

半田⁸⁾によると、笠山火山は、溶岩台地とそれを被うスコリア丘から構成されている。また、溶岩台地は、下位の斜方輝石-カンラン石-単斜輝石安山岩 (斜方輝石安山岩) と上位のカンラン石-単斜輝石安山岩 (カンラン石安山岩) に細分される (図1)。

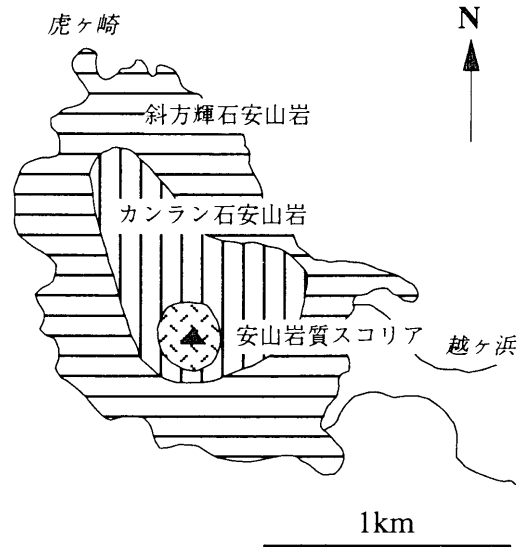


図1 笠山火山の地質図

3. 安山岩質スコリアの岩石記載

安山岩質スコリアは、全体に赤褐色多孔質な岩石で融食された直径4~6mm程度の透明な石英の捕獲結晶を含んでいる (図2)。また、稀に黒色多孔質のスコリアも見いだされる。



図2 安山岩質スコリアの露頭写真上方に500円硬貨がある

スコリアの鏡下写真を図3に示す。

赤褐色のスコリアの斑晶は、カンラン石 (2%)、単斜輝石 (3%) からなる。

カンラン石斑晶は、板状または菱形の自形~半自形の結晶で最大15mm、一般的には0.6mm程度である。結晶の周囲または内部の不規則な割れ目に沿い不透明な黒色物質が認められる。小さな結

晶では、すべて黒色物質に交代されカンラン石はわずかに残るだけという場合もある。黒色物質は、反射光下では明るさの違いから、明灰色のhost中に黒灰色のlamellae構造を示す部分と、不規則に分布する正方形板状の灰色部分から構成される。

単斜輝石斑晶は、短柱状の自形結晶で0.3~0.4mmである。砂時計構造を示すものもある。この輝石は、一般の火山岩中の輝石と異なりレモン色を示し、周縁部でさらに濃いレモン色になる。

石基は填間状組織を示し、単斜輝石、斜方輝石、斜長石、不透明鉱物と多量の黒色ガラスからなる。単斜輝石は、やや丸味を帯びており斑晶と同じく濃いレモン色を示す。また、斜方輝石は極めて細粒である。斜長石は自形で0.3~0.5mmで任意の方向に配列している。不透明鉱物は反射光下では、微細な白色の点としか観察できなかったため、岩石を粉砕後、フッ酸で珪酸塩を溶脱させた試料についてX線解析を行ったところ磁鉄鉱と赤鉄鉱が同定された。

黒色のスコリアは、構成鉱物の組み合わせや組織は、赤褐色のスコリアと同じであるが、斑晶カンラン石は新鮮で黒色部分は認められない。また、単斜輝石はわずかに淡緑色の多色性が認められるがほぼ無色である。石基のガラスも新鮮である。

4. 安山岩質スコリアの化学組成

岩石の分析には機器分析センターの蛍光X線分析装置 (JSX-60S7) を用い測定した。また、2価の鉄は、過マンガン酸カリウムによる滴定法で求めた。

安山岩質スコリアと下位の溶岩の全岩化学組成を表1に示す。安山岩質スコリアは、下位の溶岩に比べ、3価鉄に著しく富んでおり、この岩石が著しい酸化作用を蒙っていることが推定される。また、サンプル毎に2価と3価の鉄の割合が異なっている。

比較のために高酸化状態のマグマが固結したと考えられているアイスランドのKolbeinsey Islandのカンラン石ソレイト⁹⁾ とハワイのKauaiのガブロ¹⁰⁾ の分析値を示したが、これらの岩石も3価の鉄に富んでいることがわかる。



図3 安山岩質スコリアの鏡下写真

A; 赤褐色に酸化されたスコリア (リムや割れ目に沿って黒色部が認められる), B; 黒色スコリア。Ol; カンラン石, Cpx; 単斜輝石, V; 気孔。

5. 構成鉱物の化学組成

構成鉱物の化学組成の分析には機器分析センターのX線マイクロプローブ (JXA-50A, Shimadzu V6-EPMA) を使用した。

(1) 赤褐色スコリアのカンラン石・輝石

カンラン石の分析値を表2に示す。組成範囲は $Fo_{98.7-96.7}$ と狭く粒度の違いによる組成の差はほとんどない。ちなみに安山岩溶岩のカンラン石の組成は、カンラン石安山岩で Fo_{74-63} 、斜方輝石安山岩で Fo_{85-62} である。

$Fo_{98.7}$ のカンラン石のEPMAによる線分析によれば、カンラン石の部分では、Si, Fe, Mgの組成が一定しているが、リムや割れ目に沿った黒色物質は非常に不均質である。

単斜輝石の分析値を表3に示す。組成範囲は、 $Wo_{41.0}En_{50.5}Fs_{9.5}$ から $Wo_{41.2}En_{44.7}Fs_{14.1}$ である。コアの

表1 安山岩質スコリアの全岩化学組成

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
SiO ₂	55.63	52.48	56.72	55.98	50.29	50.03
TiO ₂	1.65	1.67	1.56	1.54	0.66	15.47
Al ₂ O ₃	14.54	15.56	15.38	15.59	16.08	2.82
Fe ₂ O ₃	8.58	6.45	2.91	2.90	8.98	6.49
FeO	0.27	2.50	4.92	4.91	0.38	0.40
MnO	0.13	0.14	0.12	0.12	0.17	5.68
MgO	6.73	6.85	5.08	5.24	8.18	0.16
CaO	7.70	8.07	7.31	7.33	12.79	8.51
Na ₂ O	2.80	2.48	2.98	3.02	2.37	5.76
K ₂ O	1.31	1.32	1.36	1.34	0.04	2.69
P ₂ O ₅	0.30	0.48	0.37	0.37	0.06	1.04
H ₂ O(+)	0.24	1.46	0.43	0.94	n.d.	0.36
H ₂ O(-)	0.88	0.40	0.74	0.49	n.d.	0.08
Total	99.21	99.86	99.88	99.77	100.00	99.49

- (1)Highly oxidized andesitic scoria, Kasayama volcano(Hanta, 1983),
 (2)Oxidized andesitic scoria, Kasayama volcano(Takamura, 1973),
 (3)Hypersthene andesite from Kasayama volcano(Hanta, 1983),
 (4)Olivine andesite, Kasayama volcano(ditto.),
 (5)Forsterite-enstatite basalt, Kolbeinsey Island(Sigurdsson and Brown, 1970),
 (6)Alkali gabbro from Kauai(Johnston and Stout, 1984).

部分のAl₂O₃は、1.74~5.16 wt.%とばらつきが大きい。また、Hamm and Vieten¹¹⁾の方法に従って3価の鉄を見積もった。笠山の安山岩質スコリアの単斜輝石は最高3.69wt.%のFe₂O₃を含むが、ハワイのKauaiのガブロ中の単斜輝石はさらに多くのFe₂O₃を含んでいる¹⁰⁾。

(2) 黒色スコリアのカンラン石・輝石

黒色スコリアの斑晶は、カンラン石と単斜輝石である。その代表的な分析値を表4に示す。

斑晶カンラン石は、自形で新鮮であるが一部粘土鉱物に変質している。Foは、83.6~81.7まで変化している。

単斜輝石は新鮮な自形結晶である。結晶の大きさによって組成は異なり、小型結晶では、mgは77.2~75.9、大型結晶では83.1~80.0まで変化する。

6. 議 論

笠山の安山岩質スコリアに含まれる異常にMgに富むカンラン石の形成過程を検討する。

まず、スコリアの記載岩石学的な特徴を見てみよう。

すでに述べたように笠山の安山岩質スコリアは

赤褐色で酸化を受けていることが推定される。この酸化作用が安山岩質スコリアのマグマ過程のどのステージで起こったかを推定する必要がある。一般的には、スコリアの色は冷却過程の違いによって異なる。急冷されたスコリアと酸素との接触を断たれて徐冷したスコリアは黒いが、十分な酸素を供給されつつ徐冷したスコリアは高温酸化されて赤くなると考えられている。さらに、笠山の場合、赤褐色スコリアに混じって極めて稀に黒色のスコリアが見いだされることや、スコリアのFe₂O₃とFeOの比がサンプル毎に異なったりする事実は、スコリアが形成された後、すなわちマグマが固結した後の酸化作用を示唆している。また、スコリアの斑晶カンラン石と単斜輝石の産状も重要な情報を提供している。赤褐色のスコリアでは、カンラン石のリムや割れ目が、不透明な黒色物質で交代されているが、黒色スコリアのカンラン石は、自形で黒色物質を欠き新鮮である(図3)。組成上も黒色スコリアのカンラン石に比べ赤色スコリアのそれはMgに富んでいる。

また、赤褐色スコリア中の単斜輝石は、レモン色を呈し、リムの部分で最も濃い。しかし、黒色ス

表2 赤褐色スコリアのカンラン石の
代表的な分析値

	(1)	(2)	(3)	(4)
SiO ₂	42.00	42.11	42.53	42.70
FeO*	1.28	1.34	1.39	1.28
MnO	0.21	0.67	0.33	0.23
MgO	56.25	55.64	56.23	55.60
NiO	0.34	0.33	0.23	0.26
CaO	0.07	0.46	0.09	0.23
Total	100.15	100.55	100.80	100.30
O=4				
Si	0.991	0.993	0.997	1.003
Fe	0.025	0.026	0.027	0.025
Mn	0.004	0.013	0.006	0.004
Mg	1.979	1.955	1.965	1.995
Ni	0.006	0.011	0.004	0.004
Ca	0.001	0.006	0.002	0.002
Total	3.006	3.004	3.001	2.993
mg**	98.7	98.7	98.6	98.7

*: Total Fe as FeO, **: mg=100Mg/Mg+Fe

スコリア中の単斜輝石は無色である。また、赤褐色スコリアの石基のガラスは、不透明鉱物に交代され、単斜輝石もレモン色を呈している。

これらの記載岩石学的事実も、スコリア形成後の酸化作用を支持している。

さて次に、異常にMgにとむカンラン石の成因について検討する。

従来、異常にMgに富むカンラン石は高酸化状態のマグマから晶出したと考えられていた。

例えばアイスランドのKolbeinsey Islandのカンラン石ソレイト中のカンラン石は半自形を示し、各結晶の30%まで、一般的な離溶構造を示すdustより粗粒な小さい酸化物を包有しており、組成はFo_{98.8}である。また、Kauaiのガブロのカンラン石は純粋なフォルステライト組成で燕尾状の長柱状結晶であり、酸化でできるsymplectiteも存在しないことからこれらの異常にMgに富むカンラン石は高酸化状態のマグマから晶出したと考えられた⁹⁾¹⁰⁾。

しかし、上記の例は、笠山のMgに富むカンラン石の産状とは異なっている。

ところがKauaiのガブロに捕獲されているスピネル・レーゾライト中のカンラン石は笠山のものと同様の産状をしている¹⁰⁾。この捕獲岩の外側から2cmは酸化され、その部分のカンラン石は

表3 赤褐色スコリアの単斜輝石の
代表的な分析値

	(1)	(2)	(3)	(4)
SiO ₂	48.48	50.03	51.53	43.75
TiO ₂	1.57	1.00	0.82	2.60
Al ₂ O ₃	5.16	3.60	3.32	7.32
Cr ₂ O ₃	0.46	0.40	0.23	0.00
FeO*	8.53	8.29	6.76	9.51
MnO	0.46	0.28	0.12	0.13
MgO	15.14	16.97	16.81	12.10
CaO	19.66	18.44	19.60	22.30
Na ₂ O	0.33	0.28	0.39	0.58
Total	99.79	99.29	99.58	98.29
Fe ₂ O ₃ **	3.69	3.36	1.57	8.67
FeO**	5.21	5.27	5.35	1.70
Total	100.16	99.63	99.74	99.16
O=6				
Si	1.797	1.851	1.864	1.660
Ti	0.044	0.028	0.023	0.074
Al	0.226	0.157	0.144	0.327
Cr	0.013	0.012	0.007	0.000
Fe ³⁺	0.103	0.094	0.043	0.248
Fe ²⁺	0.162	0.163	0.164	0.054
Mn	0.014	0.009	0.004	0.004
Mg	0.837	0.936	0.921	0.684
Ca	0.781	0.731	0.772	0.906
Na	0.024	0.020	0.028	0.043
Total	4.000	4.000	4.000	4.000

*: Total Fe as FeO, **: calculated by the method of Ham and Vieten (1971)

(1) - (3) Phenocryst in the andesitic scoria from Kasayama volcano (Hanta, 1983),

(4) Ferrian salite in the alkali gabbro from Kauai, Hawaii (Johnston and Stout, 1984).

oxidation symplectiteが発達している。捕獲岩のコアの部分のカンラン石に oxidation symplectite はなく組成はFo₈₈₋₉₁であり、これらのカンラン石が酸化されてよりMgに富むカンラン石 (Fo₉₅) と斜方輝石 (En₉₄) とマグネシオフェライト-マグネタイト (Mt₅₈) のbleb様のsymplectiteが形成されている。捕獲岩のリムの斜方輝石は、symplectiteが形成されている。このsymplectiteの幅(厚さ)は、ゼノリスのリムに向かって増加している。単斜輝石はAlに富むCrディオプサイドで捕獲岩のコアでもリムでも変化はなく、マントル由来の輝石の特徴を示している。この捕獲岩の記載は捕獲岩が高酸化状態に置かれ外側から内側に向かって酸化が進行したことを示している。

表4 黒色スコリアのカンラン石・輝石の代表的な分析値

	Ol	Ol	Cpx	Cpx
SiO ₂	39.79	39.75	53.17	52.82
TiO ₂			0.02	0.03
Al ₂ O ₃			2.57	3.70
Cr ₂ O ₃			0.46	0.36
FeO*	15.84	16.50	6.05	7.04
MnO	0.21	0.23	0.15	0.13
MgO	44.62	43.99	16.63	15.75
NiO	0.26	0.45	0.06	0.07
CaO	0.14	0.16	20.17	20.24
Na ₂ O			0.27	0.28
Total	100.86	101.08	99.55	100.42
O=	4	4	6	6
Si	0.995	0.991	1.953	1.931
Al			0.111	0.159
Ti			0.001	0.001
Cr			0.013	0.013
Fe	0.331	0.346	0.186	0.215
Mn	0.004	0.005	0.005	0.004
Mg	1.664	1.644	0.911	0.858
Ni	0.005	0.009	0.002	0.002
Ca	0.004	0.004	0.794	0.793
Na			0.019	0.020
Total	2.999	3.000	3.995	3.996
mg**	83.4	82.6	83.1	80.0

*, Total Fe as FeO, **, mg=100Mg/(Mg+Fe*)

笠山の赤褐色スコリアは、多孔質であることから酸化はスコリア全体に及んでいるが、観察される現象は、この捕獲岩と極めて類似している。

さて、次に笠山の赤褐色スコリア中のカンラン石の周囲や内部の不規則な割れ目に沿う不透明黒色の部分について検討してみよう。この部分は離溶構造を示す部分と正方形板状の部分からなり、組成的にはカンラン石に比べSiやFeに富む部分からなる。

さらに詳しく検討するために赤褐色スコリアのカンラン石の黒色物質のsBSE像と面分析像を検討した(図4)。sBSE像は、カンラン石の部分はほぼ均質な淡い灰色を示しているが、黒色部分はbleb状の白色部分と濃い灰色のhostの部分が認められた。面分析像は、Siは、カンラン石の部分で少なく、黒色部分で多いが、濃度は不均質である。Feは

blebの部分で多く、Mgは、hostの部分で多い。

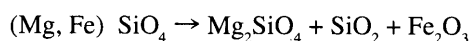
ハワイのマントル・ゼノリスのカンラン石のリムの部分にも、oxidation symplectiteが観察され、symplectiteは、マグネタイトーマグネシオフェライトからなり、hostの部分はそれらとエンスタタイトがintergrowthしている¹⁰⁾。

笠山のカンラン石の黒色部に見られるblebは、面分析の結果、Siも含まれており純粋な鉄鉱物の集合ではないようである。

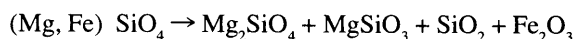
さて、Sigurdsson and Brown⁹⁾は、アイスランドのKolbeinsey Islandのカンラン石や他の鉱物間に元素の移動を示唆する証拠がないことや、カンラン石と共存する斑晶単斜輝石(Wo₄₂En₄₅Fs₁₃)と石基の斜方輝石(Wo₄En₈₈Fs₈)がMgに富んでいることから、これらの鉱物の晶出は、酸化状態で2価の鉄に乏しくなったマグマからの結晶作用によるものであると考えた。これは、高酸化状態にあるマグマからの結晶作用では、液が著しくFeOに乏しくなるために、これから晶出するカンラン石が純粋なフォルステライトに近いものになるというRoeder and Emslie¹²⁾やMysen¹³⁾の実験結果と調和的である。しかし、笠山の安山岩質スコリア中のカンラン石はFo_{99~96}と純粋なフォルステライトに近い組成を持ちながらも、カンラン石の周縁部や内部に不規則に存在する黒色部分のようなFeに富む部分と共存しており、酸化状態にあるマグマからの結晶作用にあるものとは考えがたい。すなわち、笠山の安山岩質スコリア中のカンラン石が、斑晶形成後に酸化を受けて異常にMgに富むカンラン石とFeに富む黒色部分が形成されたと考えられる。

Kolterman¹⁴⁾によればFa₃₃のカンラン石は大気圧下での加熱によって、もとのカンラン石よりもMgに富むカンラン石、シリカ鉱物、頑火輝石、赤鉄鉱、磁鉄鉱に分解する。この反応は次式で理解される。

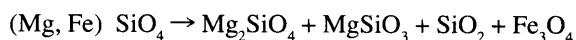
速い反応 (840°C) :



速い反応 (1080°C) :



ゆっくりした加熱 (1080°C) :



その後、カンラン石の高温酸化実験がいくつか

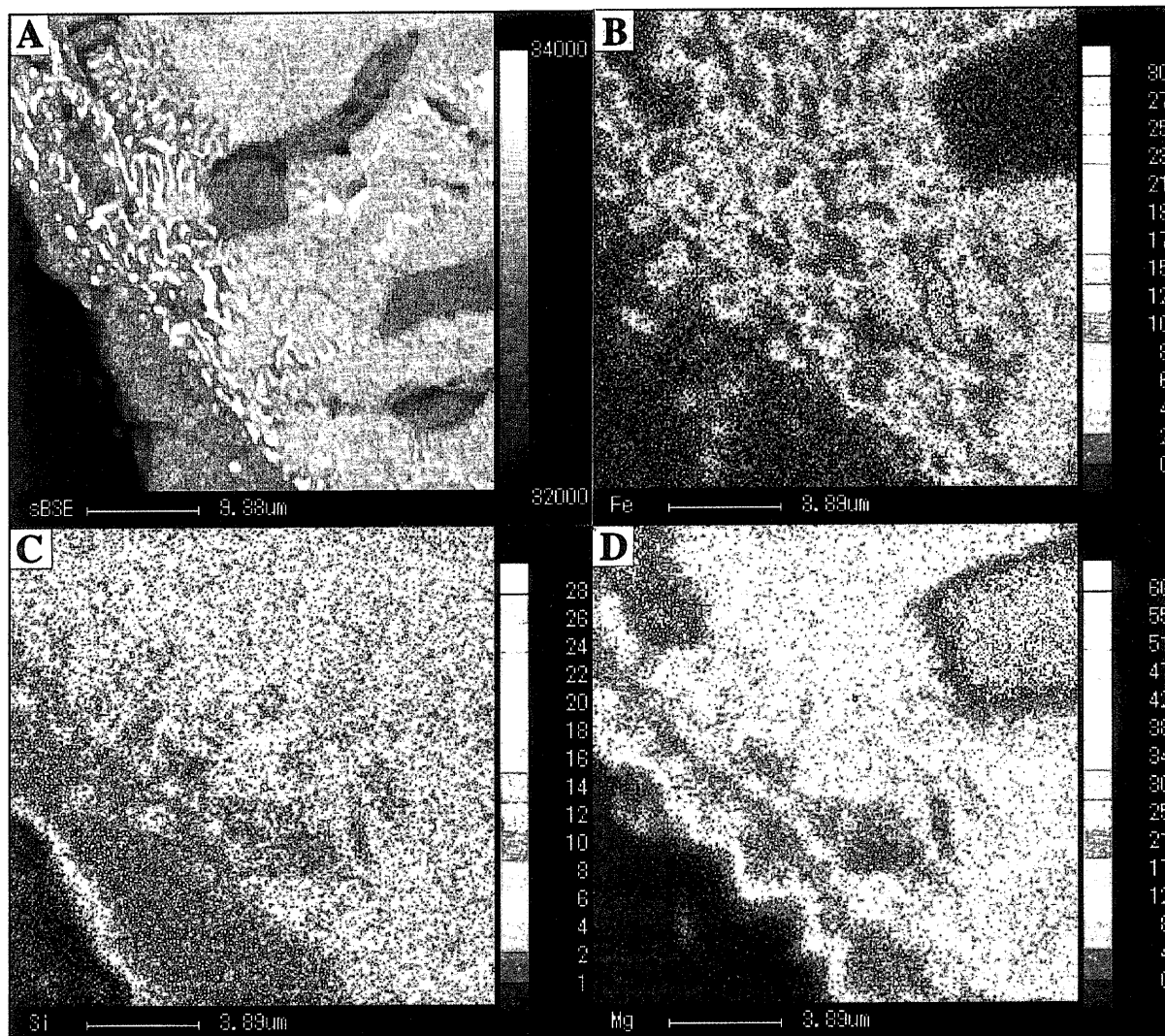


図4 赤褐色のスコリアのカンラン石の黒色部分の反射電子像 (sBSE) と面分析像 (Si, Fe, Mg)

A ; sBSE 像, B ; 面分析像 (Fe), C ; 同 (Si), D ; 同 (Mg) . なお, B, C, D, は A の一部を拡大している.

行われたが、いずれも Kolterman¹⁴⁾ と同様の結果が得られた。また、Champness¹⁵⁾ は、カンラン石を高温で酸化させた時の分解物が、転位している部分、割れ目、表面から生じることを示した。Kohlstedt and Vander Sande¹⁶⁾ は、Nunivak Island のレールゾライト・ゼノリス中の酸化したカンラン石を調べた結果、転位部分からラメラ状に成長した生成物が α -トリデマイトからなる Si に富む部分、プロト頑火輝石からなる Mg と Si に富む部分、磁鉄鉱や赤鉄鉱からなる Fe に富む部分の集合体となっていることを見いだした。これは、従来の、また彼ら自身によるカンラン石の高温酸化実験の結果と調和的である。カンラン石はある程度 Fe^{3+} を固溶することも報告されている¹⁷⁾ が、そのようなカンラ

ン石は比較的低温 (500°C 以下) で加熱された場合に顕著である¹⁸⁾ もの、火山岩中のカンラン石の場合にはそのような例は極めて少ない¹⁹⁾。

これらの実験結果や天然のカンラン石に関する報告は、笠山の安山岩質スコリア中のカンラン石が斑晶 ($\text{Fo}_{83.6-81.7}$) 形成後に酸化を受けて $\text{Fo}_{98.7-96.7}$ という異常に Mg に富むカンラン石と分解物が形成されたことを支持している。また、笠山安山岩質スコリア中のカンラン石内の黒色部分は、シリカ鉱物、磁鉄鉱または赤鉄鉱、斜方輝石の不均質な集合体からなると思われる。さらに、カンラン石が酸化してできたと考えられているライフーナイト (laihunite; 理想式 $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SiO}_4)_2$)²⁰⁾ が含まれている可能性もあるので今後さらに検討した

い。

以上の議論の結果、笠山安山岩質スコリア中の異常に Mg に富むカンラン石斑晶は、Kolbeinsey Island のカンラン石ソレアイトや Kauai のガブロや細粒の石基のように酸化状態にあるマグマからの結晶したものではなく、斑晶形成後に高温酸化を受けて形成された可能性が大きい。すなわち、高温酸化のために、カンラン石中の Fe^{2+} が Fe^{3+} となって電気的中性が保たれなくなくなり、カンラン石から吐き出されたために、カンラン石の周囲や内部の不規則な割れ目に沿い鉄酸化物を形成し、異常に Mg に富むカンラン石が形成されたのであろう。

酸化のメカニズムとしては、岩石からの H_2 の拡散とそれに伴う O_2 の増加が考えられる^{21) 22) 23)}。

謝辞：機器分析センター長の飯石一明教授には、EPMA 分析にあたり便宜をはかっていただいた。岡山大学固体地球研究センターの角縁進氏には、研磨薄片を作っていただいた。以上の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 藤 一郎, 宇井忠英, (1979); 阿武単成火山群の地質. 火山第2集, 24, 93.
- 2) 角縁 進, 永尾隆志, (1985); 阿武単成火山群の K-Ar 年代—マントル・ダイアピルの寿命—. 日本地質学会第 102 年学術大会講演要旨.
- 3) Sugi, K. (1942); Petrological studies on the basaltic rocks from Sanin and northern Kyushu, southwestern Japan. Part I. Basaltic rocks from Hagi, western Sanin. Mem. Fac. Sci. Kyushu Imp. Univ., [D], 1, 69-95.
- 4) 倉沢 一, 高橋 清, (1960); 山陰西部新生代火山岩類の化学的性質. 火山第2集, 6, 86-101.
- 5) 鷹村 権, (1973); 中国地方新生代玄武岩類の岩石学的研究並びに岩石化学的研究. 広大理地研報, 18, 1-167.
- 6) Koyaguchi, T. (1986); Textural and compositional evidence for magma mixing and its mechanism, Abu volcano group, Southwestern Japan. Contrib. Mineral. Petrol., 93, 33-45.
- 7) 永尾隆志, 半田正敏, (1985); 萩市笠山周辺の新生代火山岩類. 日本地質学会第 92 年学術大会見学旅行案内書. 119-136.
- 8) 半田正敏, (1984); 山口県萩地域の火山岩類の岩石成因論的研究. 山口大学理学研究科修士論文. 99p.
- 9) Sigurdsson, H. and Brown, G.M. (1970); Unusual enstatite-forsterite basalt from Kolbeinsey Island, north of Iceland. Jour. Petrol., 11, 205-221.
- 10) Johnston, A.D. and Stout, J.H. (1984); A highly oxidized ferrian salite-, kennedyite-, forsterite- and rhonite-bearing alkali gabbro from Kauai, Hawaii and its mantle xenoliths. Am. Mineral., 69, 57-68.
- 11) Hamm, H.M. and Vieten, K. (1971); Zur Berechnung der kristallchemischen Formel und des Fe^{3+} -Gehaltes von Klinopyroxene aus Elektronenstrahl-Mikroanalysen. Neues Jahrb. Mineral. Monatsh., 310-314.
- 12) Roeder, D.L. and Emslie, R.F. (1970); Olivine-liquid equilibrium. Contrib. Mineral. Petrol., 29, 275-289.
- 13) Mysen, B.O. (1975); Partition of iron and magnesium between crystals and partial melts in peridotite upper mantle. Contrib. Mineral. Petrol., 52, 69-76.
- 14) Kolterman, M. (1962); Der thermische Zerfall fayalithaltiger Olivine bei hohen Temperaturen. Neues Jahrb. Mineral. Montash, 181-191.
- 15) Champness, P.E. (1970); Nucleation and growth of iron oxides in olivines, $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$. Mineral. Mag., 37, 790-800.
- 16) Kohlstedt, D.L. and Vander Sande, J.B. (1975); An electron microscopy study of naturally occurring oxidation produced precipitates in iron-bearing olivine. Contrib. Mineral. Petrol., 53, 13-24.
- 17) Deer, W.A., Howie, R.A. and Zussman, J. (1962); Rock-forming minerals. Vol. 1, Ortho silicate. Longman, London.
- 18) Shinno, I. (1981); A Mössbauer study of ferric iron in olivine. Phys. Chem. Minerals, 7, 91-95.
- 19) Duba, A., Ito, J. and Jamieson, J.C. (1973); The effect of ferric iron on the electrical conductivity of olivine. Earth Planet. Sci. Lett., 18, 279-284.

- 20) Kitamura, M., Sheu, B. and Morimoto, N. (1984);
Fine textures of laihunite, a nonstoichiometric distorted
olivine-type mineral. *Am. Mineral.*, 69, 154-160.
- 21) Sato, M. and Wright, T.L. (1966); Oxygen
fugacities directly measured in volcanic gases.
Science, 153, 1103-1105.
- 22) Wright, T.L. and Okamura, R.T. (1977); Cooling
and crystallization of tholeiitic basalt, 1965 Makaopuhi
Lava Lake, Hawaii. U.S. Geological Survey
Professional Paper 1004.
- 23) Watkins, N.D. and Haggerty, S.E. (1967); Primary
oxidation variation and petrogenesis in a single lava.
Contrib. Mineral. Petrol., 15, 251-271.