

秋吉石灰岩に貫入する火成岩類の地球化学的特徴 および流体包有物と鉱化作用の関連

佐々木由香*・今岡照喜*・中島和夫**・藤川将之***

Geochemical characteristics and fluid inclusions of intrusive rocks
in the Akiyoshi Limestone, and their bearing on mineralization

Yuka Sasaki*, Teruyoshi Imaoka*, Kazuo Nakashima**, and Masayuki Fujikawa***

(Received October 1, 2013. Accepted November 3, 2013)

Abstract

The Akiyoshi Limestone Group in the Akiyoshi Plateau consists mainly of Carboniferous and Permian limestones. The Akiyoshi limestones have been intruded by Cretaceous igneous rocks including dolerites, plagiophyres and granite porphyries. X-ray fluorescence analysis of the Hananoyama granite porphyries from the defunct Naganobori mine yields Cu values of up to 484 ppm far excess of the Cu content typical of Sanyo Belt ilmenite-series granitoids (average 5.5 ppm). The Hananoyama granite porphyry contains many fluid inclusions carrying vapor phases, along with daughter minerals such as NaCl and KCl. In contrast, plagiophyres in the Ueyama district contain few fluid inclusions. This suggests hydrothermal activity in the Hananoyama granite porphyry was intense, whereas that in the Ueyama plagiophyres was weak. Contents of fluid inclusions in the Akiyoshi Plateau are thus directly related to the Cu mineralization in the area.

Keywords: geochemistry, intrusive rock, fluid inclusion, Cu mineralization, Akiyoshi, limestone

序 論

秋吉台を主に構成する秋吉石灰岩層群には、白亜紀に貫入したと考えられる火成岩が複数存在している。これらの火成岩はしばしば鉱化作用をもたらす石灰岩中に鉱床を形成している。古くから長登鉱山やかつては福鉱山とも呼ばれていた大和鉱山などの銅鉱山は良く知られている (Suzuki, 1932; 美東町教育委員会, 1995)。秋吉台は日本で一番大きな石灰岩台

* 山口大学大学院理工学研究科地球科学専攻
Graduate school of Science and Engineering, Department of Geosphere Sciences, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8512, Japan

** 山形大学理学部地球環境科学科
Department of Earth and Environmental Sciences, Faculty of Science, Yamagata University, Yamagata 990-8560, Japan

*** 秋吉台科学博物館
Akiyoshi-dai Museum of Natural History, Mine, Yamaguchi 754-0511, Japan

地であり、白亜紀に活発なマグマ活動の行われた地域であるので、両者の接触部に形成された未発見の鉱床が存在する可能性が高い。Nakano and Ishihara (2003) は秋吉石灰岩層群を構成する石灰岩中の酸素・炭素同位体とそれらに含まれる微量元素の検討を行い、マグマ起源の流体の影響により酸素同位体比が小さい場所では Fe, Mn, Zn, および Pb が濃集する傾向があることを示した。さらに酸素同位体による検討は、秋吉台の地下における火成岩の分布や潜在的な鉱床の探査に有効であることを示した。一方で鉱床探査の分野においては流体包有物の研究は鉱石鉱物がどのような温度・化学組成の溶液から形成されたかを決定するために重要である（例えば、Wilkinson, 2001；佐脇, 2003）。岩脈は小規模であるためにしばしば見落とされたり無視されたりするが（今岡, 2012）、斑岩などは鉱床形成に寄与している場合が多く、鉱床探査の上で重要な意味をもつ。本研究では、特別天然記念物区域を含む秋吉台とその周辺地域に貫入している貫入火成岩に焦点をあて、その岩石記載、化学分析および流体包有物の記載を行い、これら火成岩の地球化学的特徴と鉱化作用との関連について予察的な検討を行う。

地質と鉱床の概要

秋吉台は山口県美祢市東部に位置し、東西 17 km, 南北 7.5 km, 面積 100 km² の広がりを持つ日本では一番大きな石灰岩台地である。秋吉台が学術的に高い価値を有することは明治・大正の頃から山崎直方（山崎, 1906）、エドワード・ガントレット（Gauntlett, 1909）、小澤

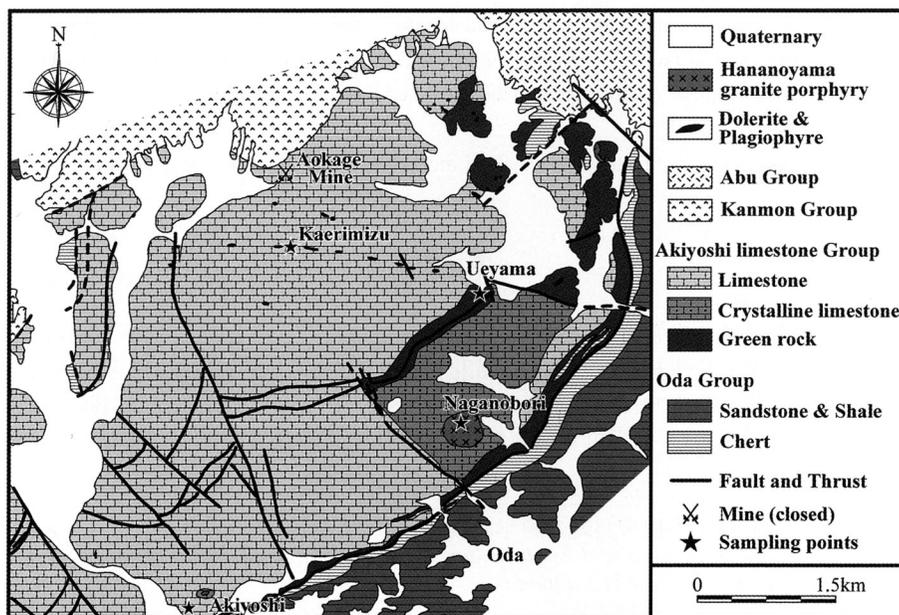


図 1. 秋吉台周辺の地質図（Ota, 1976 を基に作成）

Fig. 1. Geological map of Akiyoshi-dai in Yamaguchi Prefecture, Japan (modified from Ota 1976).

儀明 (Ozawa, 1925) などの先駆者によって明らかにされてきた。また美しいカルスト台地は 1964 年に特別天然記念物に指定され観光資源として重要であるばかりでなく、鉱物・鉍業資源としても重要である。

山口県秋吉台周辺地域の地質図 (Ota, 1976) を図 1 に示す。秋吉台周辺地域には主にペルム紀付加体である秋吉石灰岩層群と大田層群が分布し、北西部に前期白亜紀の関門層群、北東部に後期白亜紀の阿武層群が分布する。また秋吉石灰岩層群内には小規模な白亜紀火成岩体が貫入している。

秋吉石灰岩層群は石炭-ペルム系の緑色岩 (玄武岩質岩石) と浅海性石灰岩から構成される (Ota, 1976)。下位の緑色岩は植山東方から長登の南東、秋吉にかけて細長く分布し、上位の石灰岩は秋吉台にブロック状に広く分布する。また、長登周辺では花の山花崗斑岩の貫入により広く接触変成作用を受けており、結晶質石灰岩となっている (図 1)。大田層群は主にチャートと砂岩や泥岩の碎屑岩から構成され、本地域の南東部から南部に相当する大田や秋吉付近に秋吉石灰岩層群の縁に沿って分布する。秋吉石灰岩層群の岩相、化石層序と年代、地質構造、起源と形成場および形成発達史については、西村 (2012) によって解説されているので、参照されたい。

白亜紀火成岩は秋吉石灰岩層群中に岩脈状もしくは岩株状に貫入している。岩脈は複数確認されているが、特に帰水西方から植山に至る斜長斑岩の岩脈は東西方向に一連の連続性を示し、周囲の石灰岩に比較し風化が進行しやすく脆弱化しやすいために地形的に凹地を形成している。また、岩脈の岩種は秋吉のものはドレライト、植山のものは斜長斑岩からなる。秋吉台南東部の花の山 (310 m) に分布する火成岩は日本鉍業協会編日本の鉍山総攬等により花崗斑岩として記載され、Ishihara et al. (1984) では Hananoyama stock, Nakano and Ishihara (2003) では Hananoyama granite body と呼ばれている。本論文ではこれらを踏襲し、長登地域の花の山に分布する火成岩を花の山花崗斑岩と呼称する。花の山花崗斑岩は、約 800 × 300 m の小規模な岩体で周囲に広く接触変成作用を与えており、付近には長登鉍山が存在する。

長登鉍山は銅やコバルトを産出する鉍山として知られており、奈良時代から昭和 35 年に至るまで稼行と休止を繰り返しながら長年採掘が行われてきた (美東町教育委員会, 1995)。2003 年には、「長登銅山跡」として国の史跡に指定され、その採鉍跡や製錬所跡が保存されている (図 2)。渡辺 (2009) によると銅-亜鉛- (コバルト) -タングステンのスカルン鉍床で烏帽子鉍床と花の山鉍床、他 4 鉍床から成る。鉍石鉍物は主に黄銅鉍と磁硫鉄鉍で斑銅鉍、閃亜鉛鉍、方鉛鉍、磁鉄鉍等を伴い少量の輝コバルト鉍や灰重石等を含む。脈石鉍物としては柘榴石や方解石等を伴う (渋谷, 1975, 1991)。

秋吉台西端の於福に分布する花崗閃緑岩の付近には主に銅を産出した大和鉍山が位置する (Suzuki, 1932; 上野・土井, 1956)。大和鉍山はかつて於福鉍山とも呼ばれ、昭和まで主に銅を産出していた。鉍床はスカルン鉍床で鉍石鉍物として主に黄銅鉍を産し、磁硫鉄鉍、硫砒鉄鉍、閃亜鉛鉍、灰重石、方鉛鉍、黄銅鉍、斑銅鉍などを含み、脈石鉍物として柘榴石や方解石等を伴う (上野・土井, 1956)。また近年では本邦初産となるプライジンガー石 (preisingerite) が見出されており、これは自然蒼鉛やホセ鉍-A といった含ビスマス初生鉍物や硫砒鉄鉍の分解によって生じた Bi, As などを含む溶液から結晶化したものとされている (大西ほか, 2007)。美祢市秋芳町青景には青景銀山が知られている (図 1)。これは伏在する後期白亜紀の花崗岩の貫入によって形成された銀のスカルン鉍床である (山口県文化財愛護協会, 1982)。

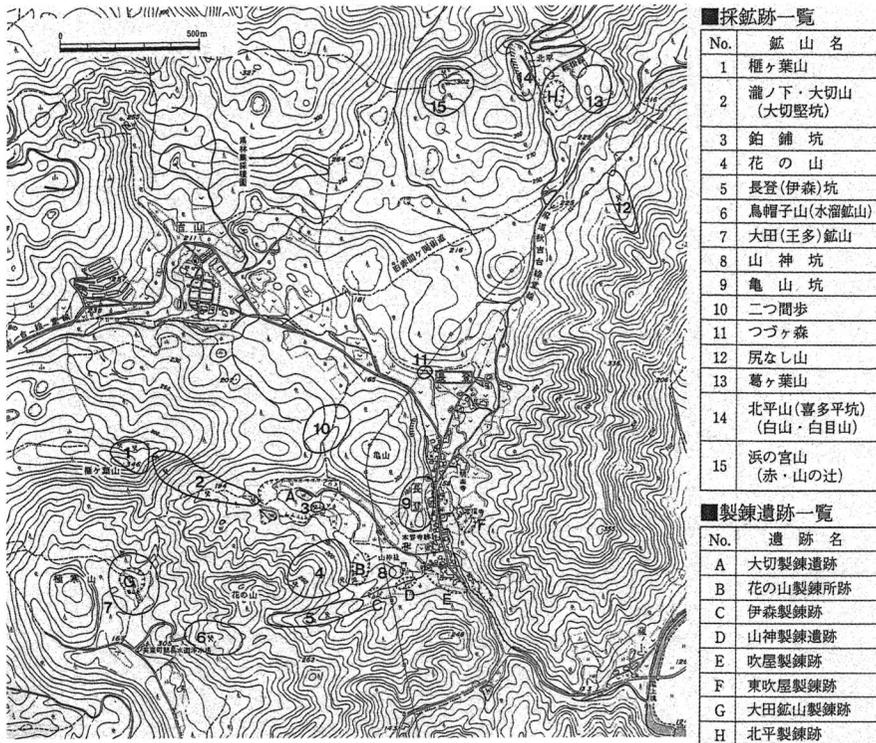


図 2. 長登銅山跡遺跡分布図 (美東町教育委員会, 1995)

Fig. 2. Distribution of remains of the Naganobori Copper Mine (Mito-cho Board of Education, 1995).

産状と岩石記載

秋吉台の秋吉でドレライトを、帰水西方と植山で斜長斑岩を、花の山で花崗斑岩を採取した。これらの採取位置は図1に示す。以下、それらについて記載する。

1. ドレライト

図3は秋吉(秋山石灰工業株式会社の採石場)におけるドレライトの産状を示す。ドレライト岩脈の幅は広い部分で約110cmで、貫入面はN10°E, 90°の走向・傾斜を示す。

図4aはドレライトの鏡下写真である。組織は完晶質斑状組織を示す。斑晶は主に斜長石と単斜輝石から構成される。斜長石は自形から半自形を示し、大きさは0.5-2mm程度ではらつきがある。変質が著しく、セリサイトや緑簾石になっているものが多いが、新鮮なものはアルバイト双晶が顕著に見られる。単斜輝石は自形を示し、0.3-1.5mmの大きさで1mm以下の物が大半である。Cr-スピネルは変質した苦鉄質鉱物中に最大30μmの自形結晶として産する。

石基は斜長石、単斜輝石、および黄鉄鉱から構成され、オフィチック組織を示す。斜長石は長さ0.3mm以下の短冊状である。黄鉄鉱は変質した苦鉄質鉱物中に最大0.2mm程度の

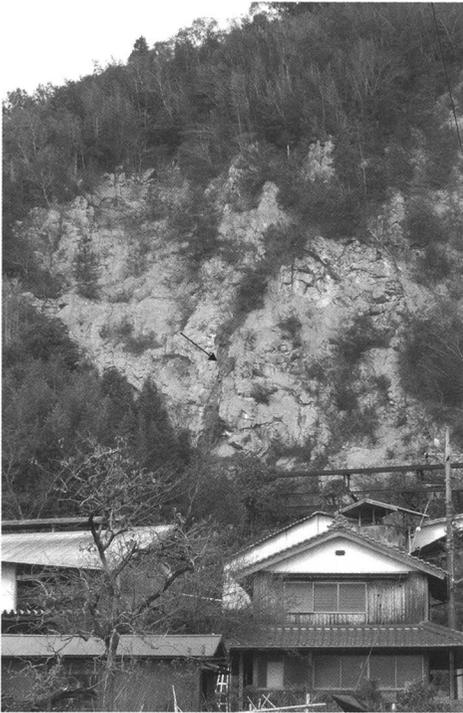


図 3. ドレイイトの産状 (秋吉, 秋山石灰工業 (株) 所有の採石場)
Fig. 3. Mode of occurrence of dolerite (Quarry of Akiyama Lime Industry Co.Ltd.)

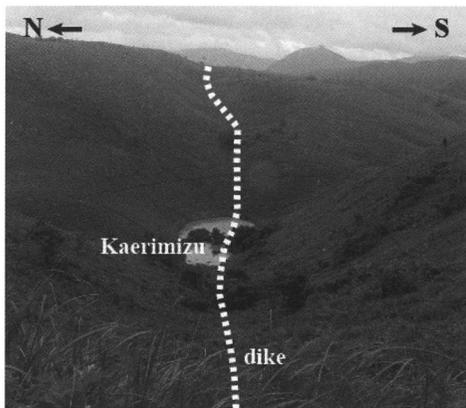


図 5. 斜長斑岩の産状 (帰水付近)
Fig. 5. Mode of occurrence of plagiophyre (Loc. Kaerimizu)

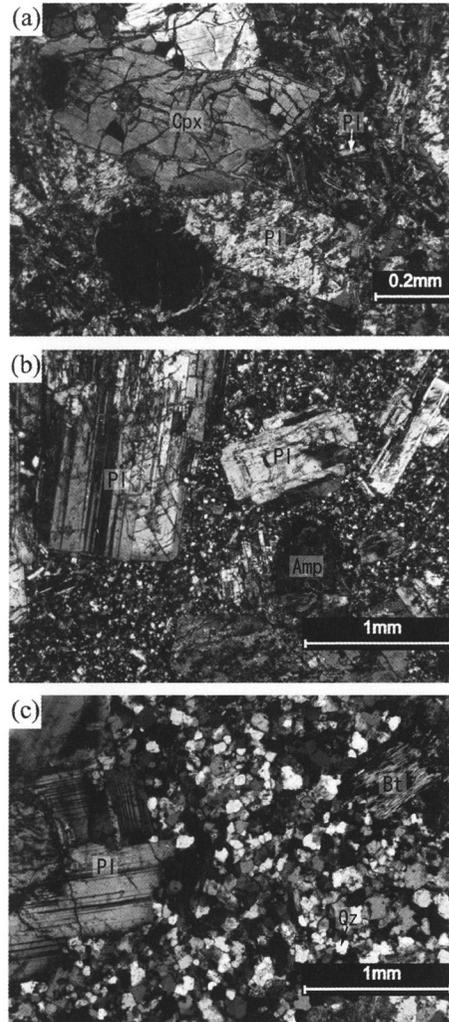


図 4. 代表的試料の顕微鏡写真
(a) ドレイイト (秋吉), (b) 斜長斑岩 (植山),
(c) 花の山花崗斑岩.

Amp = 角閃石, Bt = 黒雲母, Cpx = 単斜輝石, Pl = 斜長石, Qz = 石英.

Fig. 4. Microphotograph of the representative specimens.

(a) Dolerite (Akiyoshi),
(b) Plagiophyre (Ueyama),
(c) Hananoyama granite porphyry.

Amp = Amphibole, Bt = Biotite, Cpx = Clinopyroxene, Pl = Plagioclase, Qz = Quartz.

不規則他形結晶として多く見られる。

2. 斜長斑岩

帰水西方から植山にかけて、東西方向に断続的に岩脈が分布することが Ota (1976) によって記載されている。周囲の石灰岩に比較し風化が進行しやすく脆弱化しやすいために地形的に凹地を形成している (図 5)。

図 4b は斜長斑岩の鏡下写真である。組織は完晶質斑状組織を示す。斑晶は主に斜長石と変質した有色鉱物 (角閃石仮像)、少量の石英と不透明鉱物から構成される。斜長石は 0.5–3 mm 程度の大きさでアルバイト双晶が非常に顕著に見られる。多くは自形を示すが、角閃石仮像の斑晶と接する結晶は半自形を示す。また、3 mm 程度の大きな斑晶は稀に角閃石仮像を包有する。変質した有色鉱物は自形を示し、大きさは 0.5–2 mm 程度で斜長石よりも小さな斑晶に富む。変質が進行し緑泥石化が著しいが、外形や劈開から角閃石であったことが判別出来る。石英は 0.3 mm 程度の大きさで稀に産する。磁鉄鉱は最大 0.5mm の粒状・単独結晶として産し、イルメナイト・ラメラを含まない。磁鉄鉱とイルメナイトの粒状連晶も見られ、イルメナイトは赤鉄鉱やルチルに変質している。イルメナイトは最大 0.4 mm の長柱状–短柱状自形で、多くの粒子が赤鉄鉱やルチルに変質している。

石基は主に石英から構成され、変質した有色鉱物、不透明鉱物、少量の斜長石とカリ長石を含み、いずれの鉱物も大きさは 0.1 mm 以下である。黄鉄鉱は最大 0.5 mm の自形–半自形結晶として変質した苦鉄質鉱物や石基中に多く産する。

3. 花の山花崗斑岩

秋吉台石灰岩分布域の南東部の長登地域に位置し、花の山周辺に分布する。花の山花崗斑岩は約 800 × 300 m の小規模な岩体で、周囲に広く接触変成作用を与えている (図 1)。

図 4c は花の山花崗斑岩の鏡下写真である。組織は完晶質斑状組織を示す。斑晶は主に石英、カリ長石、斜長石と少量の黒雲母、不透明鉱物から構成される。石英は 0.5–2.5 mm 程度の大きさで自形から他形を示す。カリ長石は 1–5 mm 程度の大きさであるが、大きな結晶が多く 3–4 mm 程度の大きさのものが最も多い。自形から半自形を示し、周縁部は石基の石英を包有している場合が多い。斜長石は 1–3 mm 程度の大きさで、本岩石の斑晶のうち最も多くを占める。自形から半自形を示し、多くのものにアルバイト双晶が顕著に見られ、一部のものに累帯構造が見られる。また、大きな結晶では周縁部に石英を包有し、まれに黒雲母も包有する。黒雲母は 1–2 mm 程度の大きさで自形を示す。また、黒雲母は熱水変質によって、緑泥石化しているものが多い。

石基は主に石英、カリ長石、および斜長石から構成され、石英が特に多い。結晶の大きさは 0.1–0.3 mm 程度とやや粗粒である。イルメナイトは黒雲母中に最大 0.3 mm の長柱状自形–半自形結晶として産するほか、黒雲母の劈開の沿った最大 0.1 mm の他形結晶や石基中の緑簾石に伴って他形結晶として産する。硫化鉱物としては、磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、黄銅鉱が見られる。磁硫鉄鉱は変質した黒雲母中に最大 0.5 mm の長柱状ないし短柱状の他形結晶として産する。閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、黄銅鉱は最大 50 μm の半自形–他形結晶として産する。

全岩化学組成

1. 測定試料と測定方法

測定試料は秋吉台上のドレライト (AK05), 斜長斑岩 (AK02, AK07), および花の山花崗斑岩 (NG02, NG04, NG06) である。

全岩化学組成の測定には, 山口大学総合科学実験センター機器分析実験施設に設置されている全自動 X 線分析装置 (理学電気工業社製 RIX3000) を使用した。測定方法や分析精度は梅本ほか (2000) に報告されている。

また, REE 等微量元素の一部の分析は, カナダの Actlabs に依頼し, ICP-MS によって測定された。その測定精度は Actlabs のホームページに掲載されている。

2. 測定結果

表 1 は秋吉台の火成岩の全岩分析値を示す。また, この結果をもとに作成した主成分元素のハーカー図を図 6 に, 微量元素のハーカー図を図 7 に示す。

表 1. 秋吉台の火成岩の全岩分析値

Table 1. X-ray fluorescence and ICP-MS analyses of igneous rocks of Akiyoshi-dai.

Sample No.	AK05	AK02	AK07	NG04	NG06	NG02
岩石名	ドレライト	斜長斑岩	斜長斑岩	花崗斑岩	花崗斑岩	花崗斑岩
SiO ₂	48.44	62.70	64.13	72.63	72.89	73.83
TiO ₂	0.93	0.66	0.57	0.15	0.15	0.10
Al ₂ O ₃	15.72	15.73	15.35	14.85	14.56	13.96
Fe ₂ O ₃ **	8.42	5.34	4.23	0.93	0.74	1.06
MnO	0.17	0.11	0.10	0.02	0.02	0.05
MgO	6.41	1.55	2.29	0.16	0.35	0.20
CaO	10.79	4.83	3.67	1.15	2.00	0.79
Na ₂ O	1.69	2.83	3.66	3.15	3.65	3.09
K ₂ O	0.67	2.63	2.71	4.61	4.07	4.89
LOI	8.08	1.53	3.56	1.41	1.92	1.93
P ₂ O ₅	0.11	0.11	0.11	0.04	0.03	0.02
Total	101.43	98.02	100.38	99.10	100.38	99.92
V	197	68.6	84.4	7.0	5.6	10
Cr	311	-	44.6	3.3	2.4	0.9
Co	42.5	13.9	15	3.8	7.4	5.0
Ni	77.9	-	16.1	4.6	4.6	6.7
Cu	36.6	17.6	60	484	23.6	227
Zn	83.5	78.9	101	38.9	17.5	43.7
Pb	3.3	16.9	12.5	14.3	23.3	27.7
Ga	15*	18*	16*	16.2	15*	18.8

Sample No.	AK05	AK02	AK07	NG04	NG06	NG02
Rb	18*	59*	71*	136	91*	187
Sr	254*	232*	403*	139	124*	51.6
Y	15.3*	40.1*	15.9*	21.2	25.8*	40
Zr	66*	196*	146*	89.6	70*	59.3
Nb	3.1*	7.2*	5.7*	8.3	5.9*	9.6
Cs	7.7*	6.9*	8*	-	2.7*	-
Ba	137*	638*	547*	641	511*	333
La	7.35*	29.5*	23.1*	-	17*	-
Ce	17.2*	58.2*	45.2*	-	35*	-
Pr	2.25*	6.96*	5.11*	-	4.09*	-
Nd	10.1*	27.1*	18.5*	-	15.4*	-
Sm	2.32*	6.1*	3.44*	-	4.23*	-
Eu	0.883*	1.10*	0.826*	-	0.479*	-
Gd	2.73*	6.39*	3.36*	-	4.12*	-
Tb	0.47*	1.03*	0.52*	-	0.73*	-
Dy	2.76*	6.16*	2.88*	-	4.31*	-
Ho	0.53*	1.21*	0.56*	-	0.86*	-
Er	1.58*	3.39*	1.62*	-	2.39*	-
Tm	0.233*	0.492*	0.240*	-	0.331*	-
Yb	1.51*	3.16*	1.56*	-	2.07*	-
Lu	0.234*	0.506*	0.243*	-	0.308*	-
Hf	1.7*	4.9*	3.6*	-	2.2*	-
Ta	0.22*	0.65*	0.53*	-	0.79*	-
Th	0.91*	9.54*	9.57*	-	11.6*	-
U	0.25*	2.3*	2.5*	-	2.47*	-
Na ₂ O+K ₂ O	2.53	5.66	6.58	7.94	7.84	8.14
MgO/Fe ₂ O ₃	0.76	0.29	0.54	0.18	0.47	0.19

* ICP-MS analysis ** Total Fe as Fe₂O₃

まず、主成分元素について検討を行う。秋吉台上の火成岩のSiO₂含有量(無水)はドレライトが52 wt.%, 斜長斑岩が約65 wt.%の値を示し、花の山花崗斑岩が約75 wt.%の値を示す。

ドレライトは斜長斑岩や花の山花崗斑岩と比較してTiO₂, Fe₂O₃*, MnO, MgO およびCaOにおいて特に高い値を示す。またAl₂O₃とP₂O₅は斜長斑岩よりやや高い値を示す。一方、Na₂OとK₂Oは斜長斑岩や花の山花崗斑岩と比較して低い値を示し、Le Maitre et al. (1989)による分類ではMedium-Kに分類される。

斜長斑岩は概ねドレライトと花の山花崗斑岩の中間的な組成を示すが、Na₂Oでは2.9-3.8 wt.%の値を示し、花の山花崗斑岩が示す3.2-3.7 wt.%の値と近い値を示す。P₂O₅では0.11

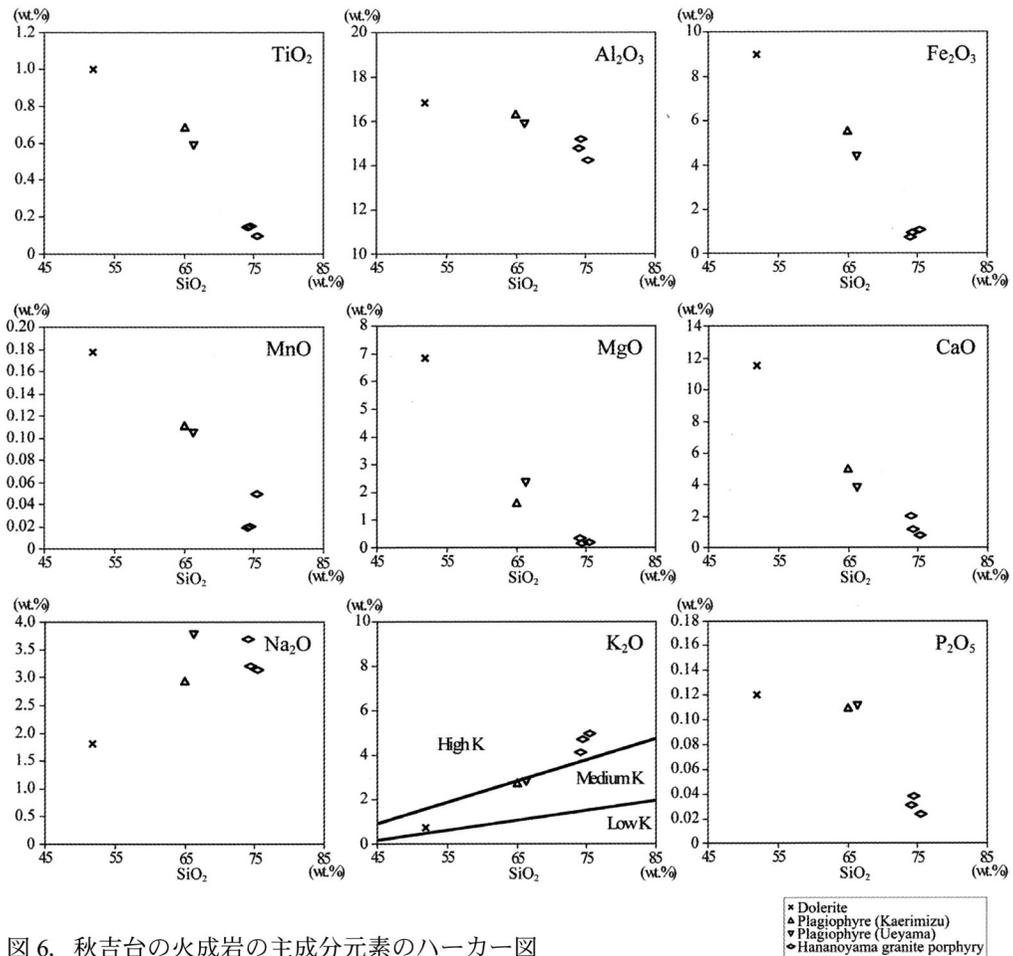


図 6. 秋吉台の火成岩の主成分元素のハーカー図

Fig. 6. Harker diagrams of major elements of igneous rocks of Akiyoshi-dai.

wt.% の値を示し、ドレイトの 0.12 wt.% の値と近い値を示す。また、Le Maitre et al. (1989) による分類では Medium-K に分類される。

花の山花崗斑岩はドレイトや斜長斑岩と比較して TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3^* 、 MnO 、 MgO 、 CaO および P_2O_5 において低い値を示す。 Na_2O は斜長斑岩と同等の値を示す。 P_2O_5 はドレイトと斜長斑岩に比べ低い値を示す。 K_2O は斜長斑岩よりも高い値を示し、Le Maitre et al. (1989) による分類では High-K に分類される。主成分元素のうち TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO および CaO は SiO_2 の増加と共に減少する傾向が見られる。

次に微量元素について検討を行う (図 7)。ドレイトは斜長斑岩や花の山花崗斑岩と比較して V (197 ppm)、Cr (311 ppm)、Co (42.5 ppm) および Ni (77.9 ppm) のコンパチブル元素に富む。一方、Rb (18 ppm)、Ba (137 ppm)、La (7.35 ppm)、Ce (17.2 ppm)、Nd (10.1 ppm)、Th (0.91 ppm)、および U (0.25 ppm) などのインコンパチブル元素は斜長斑岩や花

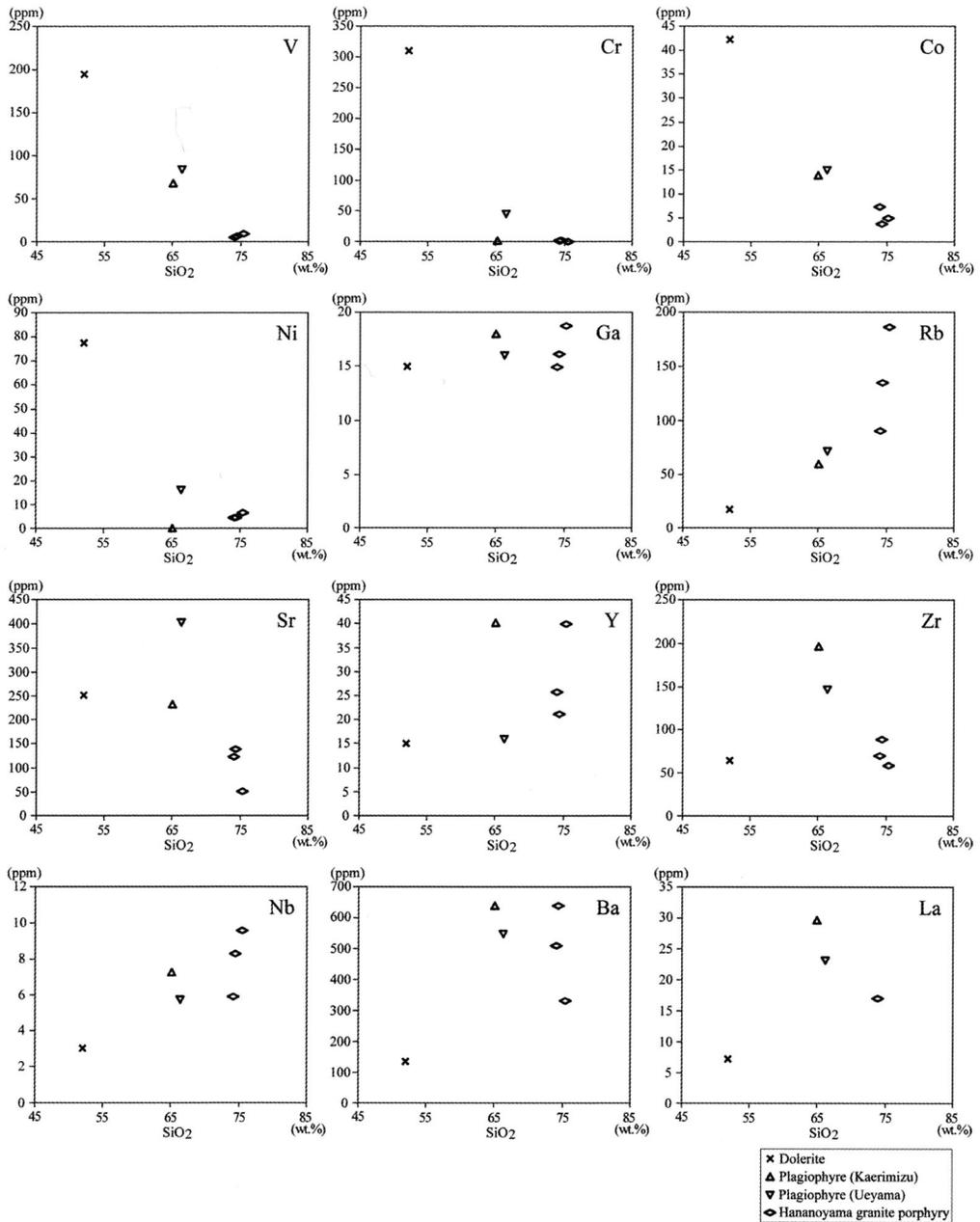


図 7. 秋吉台周辺の火成岩の微量元素のハーカー図

Fig. 7. Harker diagrams of trace elements of igneous rocks of Akiyoshi-dai.

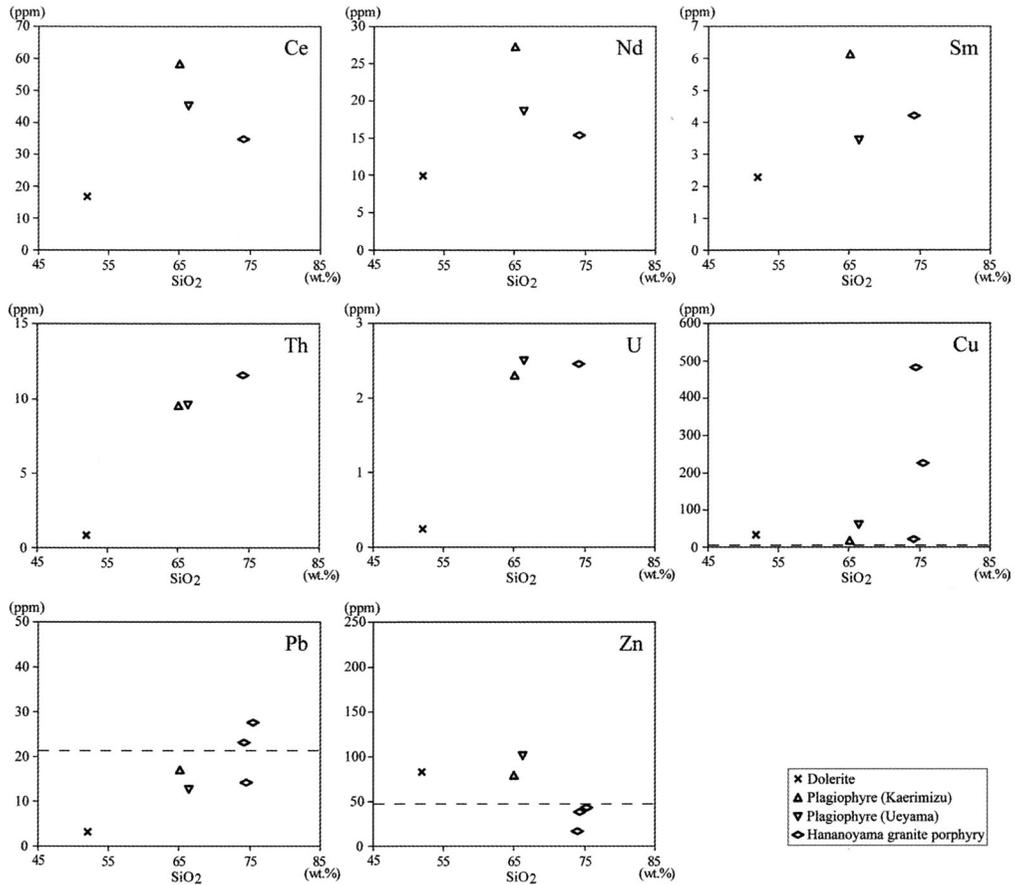


図 7-2.

の山花崗斑岩と比較して低い値を示す。

斜長斑岩では V, Cr, Co, Ni, Rb, Th, La および U といった多くの元素でドレライトと花崗斑岩の中間の値を示す。一方, Ba (547–638 ppm), Zr (146–196 ppm), Ce (45–58 ppm), Nd (19–27 ppm), Sm (3.4–6.1 ppm) などのインコンパチブル元素は斜長斑岩に最も多く含まれる。

花崗斑岩ではドレライトと斜長斑岩と比較して V, Cr, Co, Ni のコンパチブル元素および Sr で最も低い値を示す。一方, Rb (91–187 ppm) と Th (11.6 ppm), は最も高い値を示す。

また, 図 7-2 中の破線は寺島・石原 (1984) のデータを元に計算した山陽帯のチタン鉄鉍系花崗岩類における Cu, Pb, Zn の平均含有量である。Cu は山陽帯のチタン鉄鉍系花崗岩類における平均含有量が 5.5 ppm であるのに対して, ドレライトは 36 ppm, 斜長斑岩は 20–60 ppm の値を示し, 花の山花崗斑岩は低いものでも 24 ppm, 高いものでは 480 ppm に達する。Pb は山陽帯のチタン鉄鉍系花崗岩類における平均含有量は 21.1 ppm であるのに対して, ドレライトは 3.3 ppm の低い値を示し, 斜長斑岩は平均含有量よりやや低く, 花の山花崗斑

岩は値に幅があるものの平均含有量前後の値を示す傾向がある。Znは山陽帯のチタン鉄鉱系花崗岩類における平均含有量は47.0 ppmであるのに対して、ドレライトと斜長斑岩は平均含有値より高い値を示し、花の山花崗斑岩は平均含有量より低い値(17-44 ppm)を示す。

最後に、ICM-MSによって測定したREEについて検討を行う。REEパターンを図8に示す。なお、規格化を行うコンドライトの値はAnders and Grevesse (1989)によって示された値

を使用した。REEは全てインコンパチブル元素であるが、重希土類元素の方が軽希土類元素よりも不適合度が低いため、分別結晶作用が進行するにしたがってグラフ右側の重希土類元素は減少し、左側の軽希土類元素は濃集する傾向が見られる。斜長斑岩と花の山花崗斑岩にはEuに負の異常が見られるが、ドレライトには見られない。

図9にN-MORB (Sun and McDonough, 1989)で規格化したスパイダー図を示す。今回検討した試料はいずれもインコンパチブル元素に富むこと、Nb-Taにマイナスの異常が見られること、PやTiなどのHFSEに乏しいなど、沈み込み帯火成岩の特徴をよく示す。また、KとPbに顕著な正の異常が認められる。また $(La/Yb)_n$ 比はドレライトで5.9、帰水の斜長斑岩で11.4、植山の斜長斑岩で18.1、花の山花崗斑岩で10.0の値を示す。

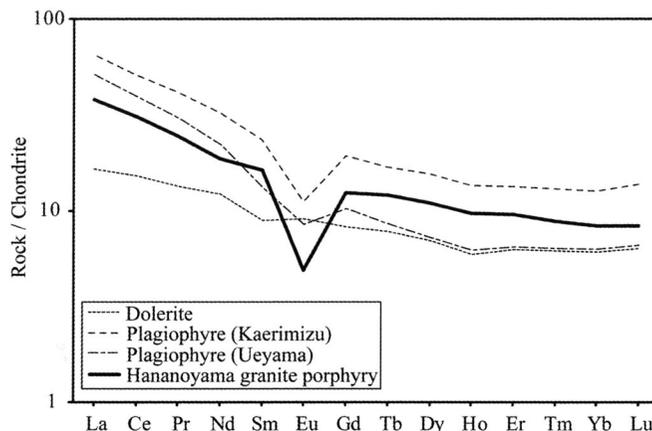


図8. 秋吉台周辺の火成岩のREEパターン

Anders and Grevesse (1989)の値で規格化した。

Fig. 8. REE pattern of igneous rocks of Akiyoshi-dai standardized by Anders and Grevesse 1989.

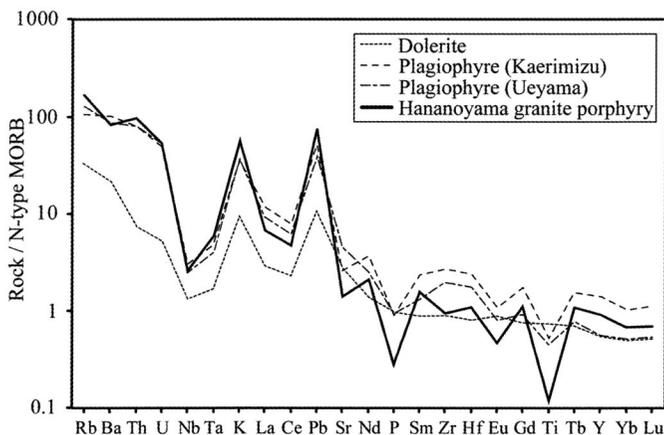


図9. N-MORBで規格化したスパイダー図

Fig. 9. N-MORB normalized spider diagram.

流体包有物

流体包有物の存在量と鉍化帯の分布には相関性があり、流体包有物が多い場所では鉍化作用が見られることが明らかにされている (Rankin and Alderton, 1983). さらに、金属の濃集には塩化物錯体が関与することが知られている。したがって、この度は流体包有物の存在量に加えて、特に流体の塩濃度に着目をして検討を行った。検討を行った試料は秋吉台上の斜長斑岩 1 試料、花の山花崗斑岩 1 試料の計 2 試料である。

図 10a は花の山花崗斑岩に含まれる 3 相包有物の鏡下写真である。また、図 10b は図 10a の包有物の拡大写真である。本試料は多くの包有物を含んでおり、その包有物は液相や気相の他に NaCl や KCl といいた塩類の娘結晶を含んでおり、気相 (V) と液相 (L) の比 (V/L 比) は変化に富んでいる。

図 10c は秋吉台上の斜長斑岩に含まれる流体包有物の鏡下写真である。流体包有物は認められるものの、その数は少なく 3 相包有物も非常に稀にしか認められない。

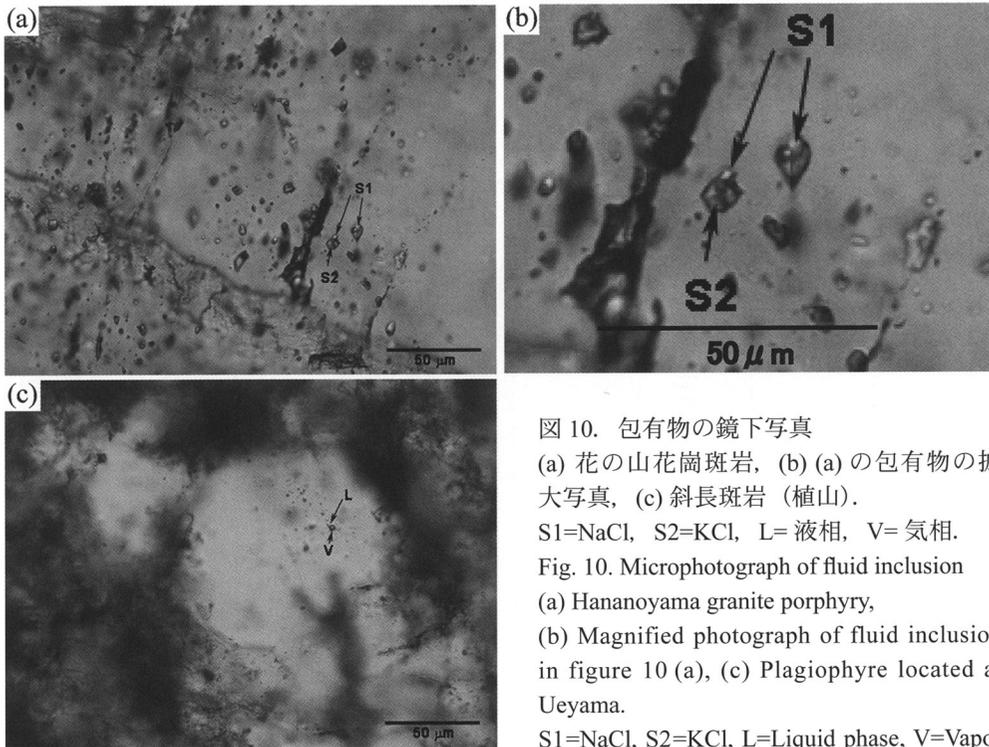


図 10. 包有物の鏡下写真

(a) 花の山花崗斑岩, (b) (a) の包有物の拡大写真, (c) 斜長斑岩 (植山).

S1=NaCl, S2=KCl, L=液相, V=気相.

Fig. 10. Microphotograph of fluid inclusion

(a) Hananoyama granite porphyry,

(b) Magnified photograph of fluid inclusion in figure 10 (a), (c) Plagiophyre located at Ueyama.

S1=NaCl, S2=KCl, L=Liquid phase, V=Vapor phase.

考 察

秋吉台上に分布する貫入火成岩（ドレイイト，斜長斑岩，花崗斑岩）の化学組成を検討したところ，沈み込み帯の性質を示し，ベースメタルなどかなりの多様性を有することが分かった．Cu, Pb, Zn に関しては寺島・石原（1984）によって示された山陽帯のチタン鉄鉱系花崗岩類における各元素の平均含有量と比較する（図7）．Cu は山陽帯のチタン鉄鉱系花崗岩類における平均含有量が 5.5 ppm であるのに対して，ドレイイトは 36 ppm，斜長斑岩は 20–60 ppm の値を示し，花の山花崗斑岩は低いものでも 24 ppm，高いものでは 480 ppm に達する．このように Cu は山陽帯のチタン鉄鉱系花崗岩類における平均含有量と比較していずれも高い値を示し，とりわけ花の山花崗斑岩では非常に顕著である．花の山花崗斑岩は既述のように磁硫鉄鉱・閃亜鉛鉱・黄銅鉱・黄鉄鉱を含み，顕著な熱水変質を受けていることが明らかである．

図 11 は NaCl–H₂O 系の温度圧力平衡図（Muntean and Einaudi, 2001）に花崗岩のソリダスをあわせて示したものである．斜長斑岩，花の山花崗斑岩共に気相と液相の 2 相包有物と 3 相包有物が確認されたので，包有物のクーリングパスはこの 2 つの領域を通りつつ，液相の

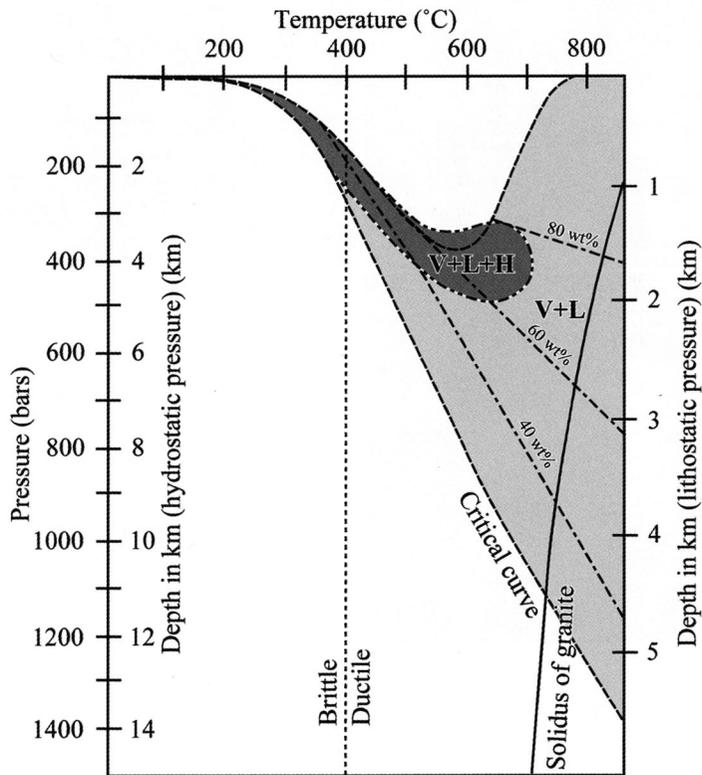


図 11. NaCl–H₂O 系 温度圧力相平衡図 (Muntean and Einaudi, 2001)

Fig. 11. Phase diagram of NaCl–H₂O system (Muntean and Einaudi, 2001).

塩濃度は上昇していったものと考えられる。今後、加熱冷却実験で特に固相を含んだものの塩濃度を調べ、具体的なクーリングパス（アイソコア）を引き、さらに詳細な議論を展開したい。なお、気体と固体の2相包有物は見られなかった。花の山花崗斑岩では充填度の異なる2相包有物や塩類の娘結晶が存在していることから、活発な沸騰現象を起こし塩濃度の高い流体が発生していると考えられる。これによって金属元素が濃集し、長登鉍山を形成した可能性が高い。一方、斜長斑岩に関しては包有物の量が少なく、3相包有物は稀であるため、沸騰現象は発生したものの活発ではなかったと考えられる。このことは秋吉石灰岩の分布域でも花の山地域が高いポテンシャル・スコアを示すのに対して、植山では低いポテンシャル・スコアを示す (Nakano and Ishihara, 2003) ことと調和的である。以上のように、石灰岩の酸素・炭素同位体や Mn・Fe・Zn・Pb・Sr などの微量元素の分布から推定されるポテンシャル・スコアと流体包有物からの推定は調和的である。なお、石灰岩分布域北部の青景銀山分布域周辺や南部の経塚山付近の火成岩分布域では、いずれも高いポテンシャル・スコアが報告されているので、今後検討する予定である。

ま と め

秋吉台石灰岩に貫入しているドレライト、斜長斑岩、および花の山花崗斑岩の岩石記載、全岩化学組成および流体包有物について予察的な検討を行い、以下のような新知見を得た。

1. 花の山花崗斑岩における Cu の含有量はドレライト、斜長斑岩や山陽帯のチタン鉄鉍系花崗岩類における平均含有量 (寺島・石原, 1984) と比較して非常に高い値を示す。
2. 花の山花崗斑岩は流体包有物を非常に多く含んでおり、NaCl や KCl といった塩類の娘結晶を豊富に含んでいる。これらから花の山花崗斑岩では、サブソリダスにおいて流体が沸騰現象を起こすことで塩濃度の高い流体が発生し、これによって金属元素が濃集し長登鉍山を形成した可能性が高い。一方、植山で採取した斜長斑岩では包有物は少なく塩類の娘結晶も稀であることから、沸騰現象は活発でなかったと考えられる。

謝 辞

山口大学大学院理工学研究科自然科学基盤系学域の澤井長雄先生には、原稿を読んでいただき、大変有益なコメントをいただいた。本研究を進める過程では、山口大学名誉教授の加納 隆先生には貴重な岩石資料のご提供頂き、秋山石灰工業 (株) の秋山 優氏には採石場での試料採取の許可を頂いた。また、秋吉台特別保護区域内の試料採取にあたっては、文化庁当局に許可を頂き、許可申請にあたっては美祿市教育委員会文化財保護課の森田孝一氏にお世話をしていただいた。以上の方々および関係諸機関に厚く御礼を申し上げます。

引用文献

- Anders, E. and Grevesse, N. (1989): Abundances of the elements: meteoritic and solar. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **53**, 197–214.
- Gauntlett, E. (1909): The cave of Yamaguchi. *Yorkshire Ramblers' Club Jour.* **3**, 41–44.
- 今岡照喜 (2012): 白垂紀の半深成岩. 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷敦著「山口県地質図 第3版 (15万分の1) 説明書」, 85–86.
- Ishihara, S., Sato, K. and Terashima, S. (1984): Chemical characteristics and genesis of mineralized, intermediate-series granitic pluton in the Hobenzan area, Japan. *Mining Geology*, **34**, 401–418.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley A.R. and Zanettin B. (1989): *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- 美東町教育委員会 (1995): 日本最古の銅山 解説長登銅山跡. 16p.
- Muntean, J. L. and Einaudi, M. T. (2001): Porphyry-epithermal transition: Maricunga belt, northern Chile. *Econ. Geol.*, **96**, 743–772.
- Nakano, T. and Ishihara, S. (2003): Geochemical characteristics of the Akiyoshi limestones, Japan and their bearing on exploration for blind skarn deposits. *Resource Geol.*, **53**, 29–36.
- 日本鉱業協会 (1965): 日本の鉱床総攬 (上巻). 297–298.
- 西村祐二郎 (2012): 秋吉帯. 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷敦著「山口県地質図 第3版 (15万分の1) 説明書」, 24–36.
- 大西政之, 草地 功, 小林祥一, 藤原由輝, 西田勝一 (2007): 山口県大和鉱山産プライジンガー石. 岩石鉱物科学, **36**, 61–65.
- Ota, M. (1976): Geologic map of the Akiyoshi district. *Bull. Akiyoshi-dai Museum, Natural History*, (12), 1–34.
- Ozawa, Y. (1925): Paleontological and stratigraphical studies on the Permo-Carboniferous limestone of Nagato. Part 2, Paleontology. *Jour. College Sci., Imper. Univ. Tokyo*, **45**, 1–90.
- Rankin, A.H. and Alderton, D.H.M. (1983): Fluid inclusion petrography of SW England granites and its potential in mineral exploration. *Mineral. Deposita*, **18**, 335–347.
- 佐脇貴幸 (2003): 流体包有物—その基礎と最近の研究動向—. 岩石鉱物科学, **32**, 23–41.
- 渋谷五郎 (1975): 鉱物と鉱床. 高橋英太郎ほか「山口県の地質」. 山口博物館, 233–277.
- 渋谷五郎 (1991): 山口県鉱物誌—山口県産鉱物の研究—. 山口県鉱物誌刊行会, 山口大学理学部地質学鉱物科学教室. 210p.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989): Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, in: Saunders, A.D., Norry, M. J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publication 42, pp. 313–345.
- Suzuki, J. (1932): The contact metamorphic ore deposits in the environs of the Ofuku mine, Province of Nagato, Japan. *Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. IV, **2**, 69–131.
- 寺島 滋, 石原舜三 (1984): 日本の花崗岩類中の銅, 鉛, 亜鉛, ヒ素と硫黄 — (2) 西南日本内帯—. 地質調査所月報, **35**, 127–145.
- 上野三義, 土井啓司 (1956): 山口県大和鉱山銅鉱床調査報告. 地質調査所月報, **7**, 167–176.
- 梅本研吾, 今岡照喜, 山崎 徹, 大和田正明 (2000): 混合融剤 (A12) を使用した岩石の蛍光 X線分析. 山口大学機器分析センター報告, (8), 16–23.

- 渡辺 洵 (2009): 長登鉱山. 日本地方地質誌 6 中国地方 . 453–454, 日本地質学会 .
- Wilkinson, J.J. (2001): Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229–272.
- 山崎直方 (1906): 秋吉台カルストに就きて. 地質雑, **13**, 337–344. Pls. 10–11.
- 山口県文化財愛護協会 (1982): 生産遺跡分布調査報告書「採鉱・冶金」. 山口県埋蔵文化財調査報告書第 67 集, 133p.