

後期中新世東北日本弧における
鉍脈型銅鉍化作用に関連したマグマプロセス

2021 年

学籍番号 6519102

左 部 翔 大

Late Miocene magma processes associated with
vein-type copper mineralization in the Northeast Japan arc

Shota Satori

Abstract

A large number of Neogene vein-type copper deposits are distributed in the Northeast Japan arc, which is a volcanic arc associated with subduction of the oceanic plate but lacks porphyry-type copper deposits. Those vein-type copper deposits consist of the largest copper district in Japan arc and associated with neighboring Miocene and Pliocene felsic intrusive rocks. Most of these intrusive rocks show granitic-dioritic compositions and fine-grained holocrystalline texture, with dark green to gray colored enclaves.

The purpose of this study is to clarify the properties and generation process of magmas as a source of copper-bearing magmatic fluid, and to quantitatively clarify the amounts of copper and sulfur released from magma. Felsic intrusive rocks and included enclaves in the Arakawa area, which have been clarified to be temporally and spatially related to the copper mineralization in the Arakawa.

The three felsic intrusive rocks in the Arakawa area consist of plagioryholite and amphibole micro-granite stocks. The enclaves contained in felsic intrusive rocks are basaltic to dacitic compositions and are mainly classified into three types: clinopyroxene-bearing hornblende gabbro, hornblende andesite and hornblende dacite. Some of these enclaves have a chilled margin or a chemical reaction halo formed by the reaction of two liquid magmas, and show characteristics of MME (mafic magmatic enclave/mafic microgranular enclave). Basaltic enclaves contain relatively large amounts of sulfide minerals. Bornite, chalcopyrite, and pyrite are included in late-crystallized amphibole in the enclaves and are often accompanied with magnetite.

The whole rock chemical composition of the felsic intrusive rocks are classified to sub-alkaline rhyolite. Those felsic rocks were classified to magnetite-series granite and show a low Sr/Y ratio, which shows characteristic of rhyolitic magma accompanied with typical island arc magmatism derived from the wedge mantle. The whole-rock chemical compositions of basaltic enclaves show characteristics of sub-alkaline basalt and basaltic andesite accompanied with

typical island arcs magmatism derived from wedge mantles.

In addition, the anorthite (An) content of plagioclase shows the maximum of 89 %, indicating that it was formed from water-rich basaltic magma. All plagioclase in basaltic MME is lath-shape with An 36-89 % and Cu 2.8-35.7 ppm. The copper content of the whole rock and melt calculated using the partition coefficient of plagioclase and silicate melts are 65-106 ppm and 144.9 ± 47.6 ppm, respectively, and the minimum difference between the two is 0 ppm. Micro-granite mainly contain tabular-shaped plagioclase with An 11-38 % and Cu 0.5-5.1 ppm. The copper content of the whole rock and melt calculated using the partition coefficient are 1 ppm and 21.3 ± 2.8 ppm, respectively, and the minimum difference between the two is 17.5 ppm. Andesitic enclave mainly contains lath-shaped plagioclase (An 12-55 %, Cu 0.8-4.4 ppm) similar to the basaltic enclave. The copper content of the whole rock and melt calculated using the partition coefficient are 3.4 ppm and 18.8 ± 6.4 ppm, respectively, and the minimum difference between the two is 9.0 ppm. On the other hand, lath-shaped plagioclase (An 13-57 %, Cu 8.4-17.9 ppm) and tabular-shaped plagioclase (An 4-41 %, Cu 0.0-3.8 ppm) are coexisting in the dacitic enclave. In particular, the An and Cu contents of those lath-shaped plagioclase and plagioclase from the basaltic enclave show a continuous and linear compositional trend in which Cu content increases as An value decreases. It was suggested that dacitic magma was formed by mixing of andesitic magma differentiated from magma forming basaltic enclaves and rhyolitic magma according to the crystal habits and elemental compositions of plagioclase and mass balance calculation of whole rock chemical compositions. The copper content of the whole rock and melt calculated using the partition coefficient of plagioclase and silicate melts are 2 ppm and 59.0 ± 6.6 ppm, respectively, and the minimum difference between the two is 50.4 ppm. This value indicates that about 96 % of the copper contained in the magma was released with the fluid during crystallization process.

The redox states of rhyolitic, dacitic and basaltic magmas were calculated by an amphibole geothermometer and oxybarometer. The redox states of rhyolitic and dacitic magma calculated to $\Delta\text{NNO} + 1-2$, and basaltic magma was calculated to around NNO buffer. The former value shows a higher oxidation state than SSO (sulfide-sulfur oxide buffer), and the latter value shows a lower oxidation state than SSO. Those results suggested that copper was not precipitated in the magma as sulfides but separated and released together with the fluid in the crystallization process of oxidized dacitic magma, which has relatively high release amount and ratio of copper.

The apatite contained in the micro-granite and dacitic enclave contains <0.77 and <0.92 wt.%

of SO_3 , respectively. The sulfur content of the whole rock and rhyolitic melt calculated using the partition coefficient of apatite and melt are 22 ppm and <60 ppm, respectively, and the amount of sulfur released from the rhyolitic magma is around 40 ppm. The sulfur content of the whole rock and dacitic melt calculated using the partition coefficient of apatite and melt are 26 ppm and <120 ppm, respectively, and the amount of sulfur released from the dacitic magma is around 100 ppm.

From the above results, the minimum volume of magma required to produce the Arakawa copper deposit was estimated when the copper and sulfur released amount from the dacitic magma are 50 ppm and 100 ppm, respectively. The minimum volume of magma required to produce the Arakawa deposit was estimated to be about 1.6 km^3 from the released amount of copper and about 8.8 km^3 from the separated amount of sulfur when the total amount of concentrated in the Arakawa deposit are set to 200,000 tons copper and 2,200,000 tons sulfur.

According to these results, it is considered that the magma system that formed the Arakawa deposit was consists of the oxidized rhyolitic magma and the copper, sulfur, and water-rich basaltic magma associated with the island arc magmatism. In addition, it is suggested that the oxidized dacitic magma formed by mixing oxidized rhyolitic magma and andesitic magma (differentiation from the basaltic magma) efficiently releases copper and sulfur during crystallization and caused copper mineralization.

Keywords: Northeast Japan arc, Arakawa deposit, magmatic enclaves, redox state, ore-related magma, copper released from magma

目次	頁
1. 緒言	6
2. 荒川地域の地質	11
2.1. 地質概説	11
2.2. 地質各説	13
3. 荒川地域の金属鉱化作用	18
4. 研究手法	19
4.1. 機器分析	19
4.2. マグマの物理化学条件の推定	22
5. 荒川銅鉱床の形成に関連した貫入岩	23
5.1. 牛沢又岩体	23
5.2. 牛沢又北岩体	27
5.3. 牛沢又東岩体	33
6. 岩石試料の全岩元素組成	38
6.1. 主要元素組成	38
6.2. 微量元素組成	45
6.3. 希土類元素組成	51
7. 鉱物元素組成	54
7.1. 角閃石	54
7.2. 単斜輝石	67
7.3. 斜長石	72
7.4. 燐灰石	85

8. 考察	89
8.1. 鉱床関連火成岩の形成過程	89
8.2. マグマの混合・混交過程	93
8.3. メルトの銅及び硫黄含有量及び放出量の推定	104
8.4. 鉱床形成に必要なマグマ規模の推定	111
9. 結論	113
謝辞	117
引用文献	118

1. 緒言

火成岩と密接な関連を有する熱水鉱床にとって、マグマや熱水の挙動は金属元素の移動や濃集に深い関連を持っている。具体的には、斑岩型銅鉱床などの熱水鉱床は珪長質なマグマより放出される熱水が鉱化作用をもたらすことが知られている。特に銅鉱床はそのほとんどが火成活動に伴われるマグマ-熱水活動によって形成され、典型的な鉱床タイプに斑岩型鉱床、スカルン型鉱床、鉱脈型鉱床が挙げられる。マグマ-熱水活動に伴われる銅鉱床で最も典型的な鉱床タイプは斑岩型鉱床である。斑岩型鉱床は世界で最も主要な銅資源の供給源であり、沈み込み帯の火成活動に伴って形成されるが、典型的な沈み込み帯の火山弧である東北日本弧には発見されていない。一方で、東北日本弧には新第三紀中新世中期から鮮新世にかけて形成された鉱脈型銅鉱床や銅を伴う鉛亜鉛鉱床が多数存在し、栃木県足尾鉱山や秋田県荒川鉱山、阿仁鉱山、尾去沢鉱山が代表的な鉱床に挙げられる(図 1)。これらの鉱床では特徴的に鉱床近傍に珪長質の火成岩体が存在している点で共通した特徴を有し、特に荒川鉱山、阿仁鉱山、尾去沢鉱山、不老倉鉱山、鷲合森鉱山、日正鉱山、八総鉱山では鉱脈型鉱床と珪長質な貫入岩が共存し、その分布は隣接または重複している。

Satori et al. (2022)は鉱脈型銅鉱床と隣接する貫入岩との関連を明らかにし、マグマ-熱水系の復元と鉱化作用の解明を行うにあたり、鉱床と貫入岩が隣接する秋田県荒川地域で研究を行った。その結果、鉱脈型銅鉱床とその近傍に存在する珪長質貫入岩は、それぞれの形成年代が一致すると共に、貫入岩を中心とした熱水変質帯中に鉱脈型銅鉱床が存在し、貫入岩を浅所貫入相とする珪長質マグマだまりを起源とする熱水が貫入岩周辺の熱水変質帯と鉱脈型鉱床を形成したことが明らかとなった。

鉱床に隣接する貫入岩が鉱化作用をもたらしたことが、時間的・空間的に明らかにされている研究成果は、斑岩型銅鉱床を中心として多くの鉱床で認められるが、鉱床形成に関与したマグマの銅や硫黄の供給能力や、流体相に銅や硫黄を効率的に分配するマグマの性質を明らかにすることは、鉱床の形成過程を明らかにする上で極めて重要である。

典型的なマグマ-熱水性銅鉱床である斑岩型銅鉱床を形成したマグマは、特徴的に高い酸素分圧で形成されたことが明らかになっている(例えば, Hedenquist and Lowenstern, 1994; Mungall, 2002; Richards, 2015 など). 具体的には, $\Delta\text{NNO}+2-3$ といった高い酸素分圧を示す酸化的なマグマである. また, Jugo et al. (2015)はマグマ中における硫黄の酸化還元状態の変化は, 酸素フガシティが FMQ 緩衝曲線から, $\Delta\text{FMQ}+2$ の範囲で生じることを示した. したがって, 多くの斑岩型鉱床を形成したマグマは, 硫化物-硫酸塩緩衝曲線(SSO)よりも高い酸素分圧を示し, マグマ性硫化鉱物が形成されにくい物理化学条件を示す. 特に SO_2 はメルトへの溶解度が低い為(Burnham, 1979), 鉱床を形成する熱水系に硫黄や金属(親銅元素)が効率的に供給されることが明らかにされている. 硫黄に富み, 酸化的なマグマからはマグマ性硬石膏や SO_3 に富む燐灰石が晶出し, 特に前者はマグマの上昇, 冷却, 結晶化の過程における分解に伴って, SO_2 ガスを放出し, 鉱床を形成する熱水に硫黄を供給する(Streck and Dilles, 1998; Chambefort et al., 2008; Houston and Dilles, 2013 など). このことは, Ishihara (1981)によるマグマの酸化還元状態に基づく花崗岩系列の区分と伴われる硫化物鉱床の大小の差に関連が認められることと調和的である. また, Sasaki and Ishihara (1979)による花崗岩と鉱床の硫黄同位体比の類似性は, 鉱床硫黄が花崗岩質マグマからもたらされたことを示し, 硫化物鉱床に濃集する硫黄の起源はマグマであることを示した.

Chelle-Michou et al. (2017)は、斑岩型銅鉱床形成過程をシミュレートし、鉱床形成に必要なマグマの金属含有量、マグマの体積、マグマの注入速度の相対的な関連を明らかにすることを目的とした研究を行った。金属元素を含む流体に飽和したマグマの定置、冷却、脱ガス過程を銅、鉛、亜鉛、硫黄を対象とした鉱物-メルト間、メルト-流体間の分配係数を用いてシミュレートすることによって、銅や硫黄に富むマグマは鉱床形成の可能性を高めるが、巨大な鉱床を形成するために必要な要素ではなく、マグマの量と活動の持続時間が巨大なマグマ-熱水性銅鉱床を形成するために重要な要素であることを示した。

一方、鉱床と貫入岩が重複して存在する斑岩型鉱床を対象として、鉱化作用をもたらしたマグマの金属や硫黄の放出量や鉱床形成に必要なマグマの体積の推定が試みられている。Chelle-Michou and Chiaradia (2017)はペルーの Corocochuayco 斑岩-スカロン銅鉱床を形成したマグマの塩素及び硫黄の含有量を燐灰石及び角閃石の鉱物組成と鉱物-メルト間の分配係数を利用した計算によって、マグマの塩素及び硫黄の含有量を算出した。さらに、鉱床に濃集した黄銅鉱や黄鉄鉱、輝石や柘榴石に含まれる銅及び鉄を塩化物錯体として運搬した塩素の量と、硫化鉱物及び硫酸塩鉱物として晶出した硫黄の量を計算することで、鉱床形成に最低限必要なマグマの体積を推定した。

鉱床へ供給される大量の銅や硫黄の供給源として、地下浅所に存在する珪長質マグマだまりの下部に定置もしくは注入する苦鉄質マグマの存在が挙げられている(例えば、Hattori and Keith (2001); Maughan et al. (2002); Blundy et al. (2015); Cao et al. (2018)).

Hattori and Keith (2001)は、ピナツボ火山やビンガム鉱床では珪長質マグマだまりの下部に位置する苦鉄質マグマから硫黄や親銅元素が供給されたことを示し、Maughan et al. (2002)は、苦鉄質マグマからの揮発性物質や金属元素を供給するにあたり、必ずし

もマグマ混合が必要ではないことを示した。Cao et al. (2018)は、珪長質マグマに注入した苦鉄質マグマとの混合によって形成された組成累帯構造を示す角閃石及び輝石の銅含有量と鉍物-メルト間の分配係数を用いて、銅に富む苦鉄質マグマが珪長質マグマだまりの銅を供給したことによって斑岩型銅鉍床が形成された可能性を示した。これらの研究は、銅鉍床を形成するマグマは、少なくとも2つの端成分マグマからなるマグマ系の総合的なマグマ過程の一環として、銅及び硫黄に富む流体が分離し、銅鉍床が形成されることを示している。特に銅は造岩鉍物に不適合かつメルト-流体間では流体に分配されやすいことで特徴づけられる半揮発性元素に分類され(Collins et al., 2009)、マグマの結晶化に伴ってメルト中に濃縮し、流体相の分離(脱ガス)が発生した際には流体としてマグマから分離されることが知られている(Cline, 1995 など)。

本研究では、先行研究によって鉍床と貫入岩の成因的な関連が明らかな秋田県荒川鉍床近傍の牛沢又貫入岩群を対象として、鉍化流体の起源とされる貫入岩のマグマが銅や硫黄を供給する性質を有しているかを検証すると共に、斑岩型鉍床が欠如する東北日本弧の銅鉍床を形成したマグマ系の特徴を明らかにすることを目的として、マグマプロセスの解明及びマグマから放出された銅及び硫黄の定量的な推定を行った。

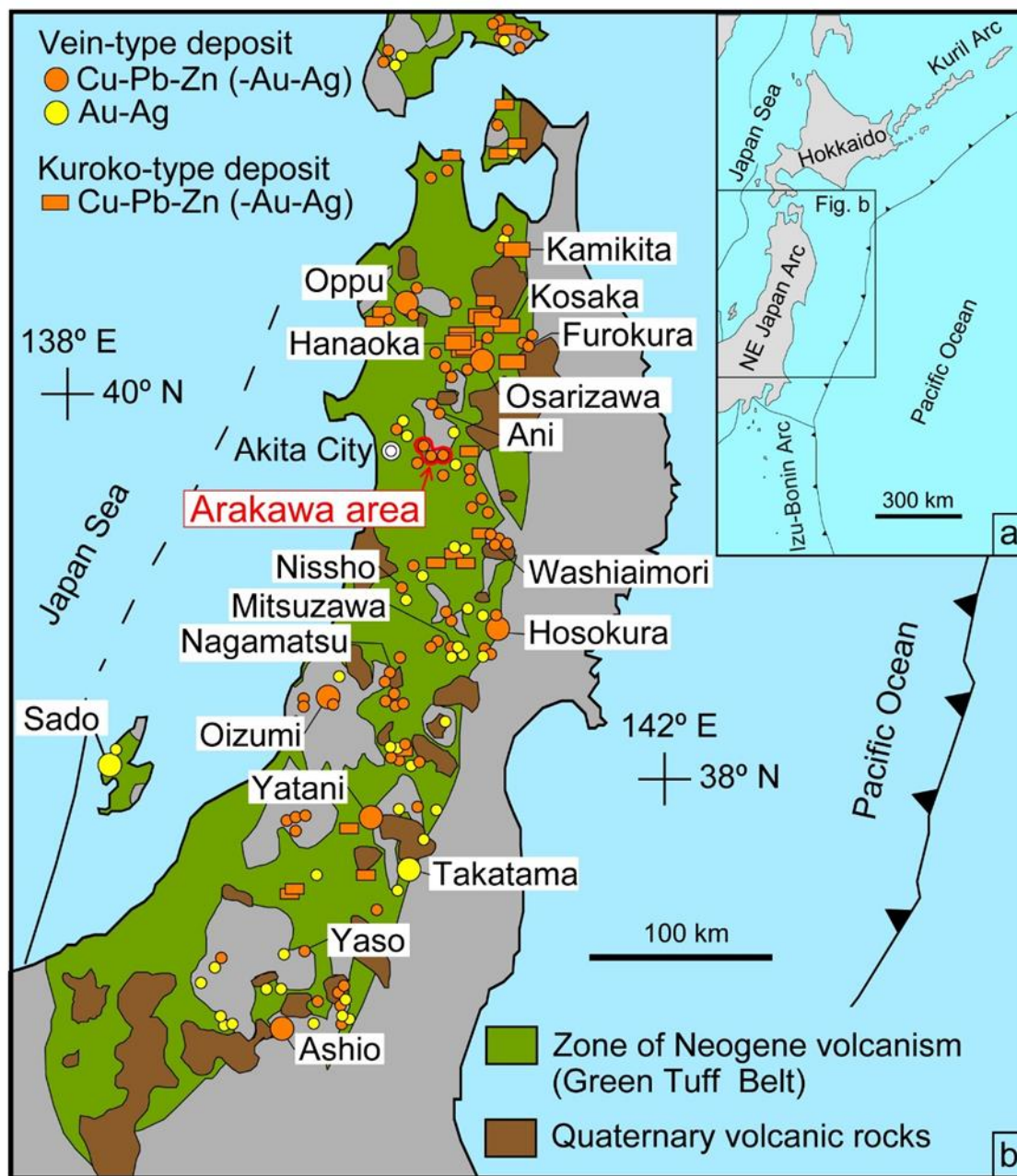


図1 新生代東北日本弧における熱水性金属鉱床の分布

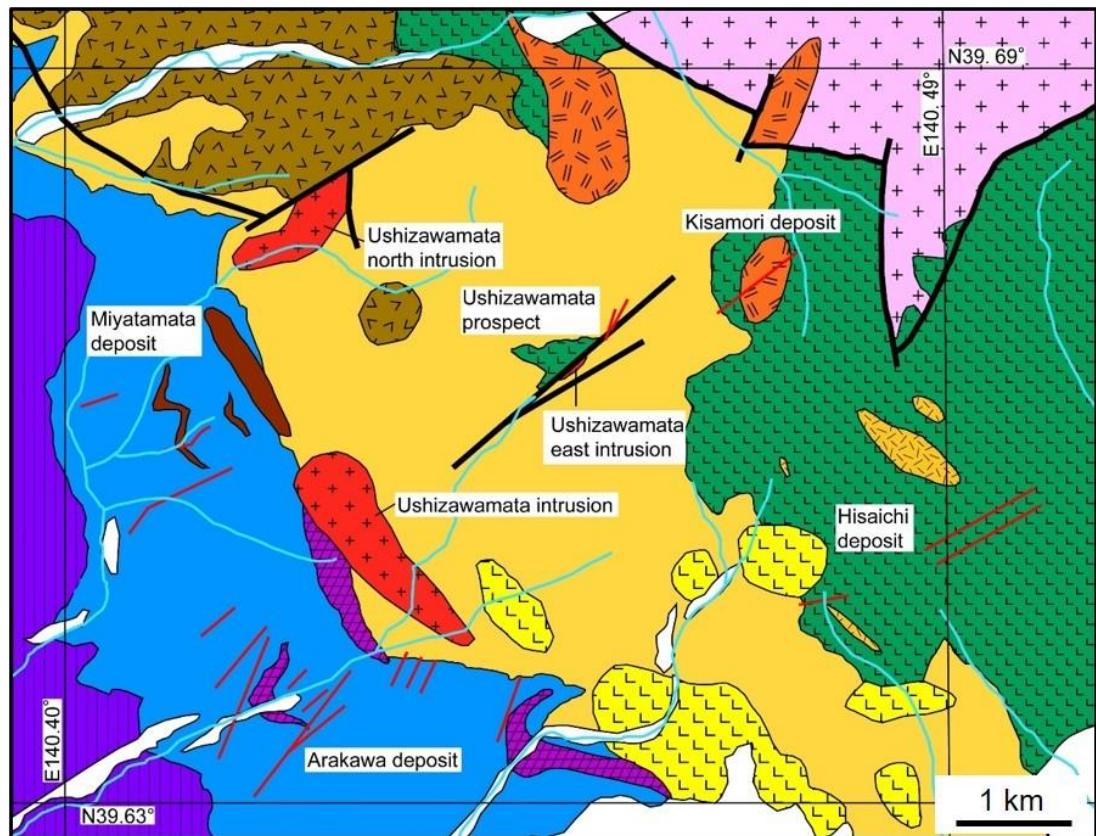
Takashima and Igarashi (1973)及び須藤・五十嵐(1997), 須藤(1998), Inoue and Honza (1983), Garwin et al. (2005)を改変。鋸刃状の線は海溝の位置と沈み込み方向を示す。

2. 荒川地域の地質

2.1. 地質概説

荒川地域は秋田市東方約 30 km に位置し、東北日本弧における新生代火成活動が活発だった地域である。荒川地域には、主に後期漸新世から中期中新世までの火山岩及び堆積岩が分布している(図 2)。本地域北東部から南西部にかけて各層が累重しており、北西方向の走向及び 12-25°で西に傾斜する同斜構造を形成している。本地域内で北東部に位置する最下位の地層は白亜系基盤岩である太平山深成変成岩類であり、花崗岩及び花崗閃緑岩、片岩などからなる(藤本, 2006)。その上位に萩形層の安山岩溶岩が分布し、太平山深成変成岩類を不整合で覆う。その上位には陸成の大倉又層が分布し、溶結凝灰岩及び凝灰岩類、流紋岩-デイサイト及び安山岩の溶岩からなる。その上位には整合で海成の砂子淵層が被覆する。砂子淵層内では最下部から凝灰質泥岩及びシルト岩、珪長質凝灰岩類、凝灰質シルト岩が挟在する凝灰岩類が存在し、最上部は塊状泥岩から構成されている。また、一部で安山岩溶岩が挟在する。砂子淵層の上位には整合で女川層が存在し、硬質泥岩、塊状泥岩で構成されている(土谷・吉川, 1994; 図 2)。

本地域内北東部には岩株状及び岩脈状の石英斑岩が 3 か所に貫入している(大沢ほか, 1981)。また、中央部の荒川上流部牛沢又と本地域北部の宮田又沢川上流で大倉又層の凝灰岩類にマイクロ花崗岩が貫入している。また、本地域東部の牛沢又上流部に萩形層の安山岩溶岩と大倉又層の溶結凝灰岩の境界をなす正断層に沿って流紋岩が貫入している。大倉又層上部の凝灰岩類から砂子淵層の中部にかけてドレライトの岩床が貫入しており、4 つの岩床が存在している。



Legend

Quaternary	Fluvial sediment and Terrace Deposit	Gravel, sand and mud
Holocene		
	Intrusive rocks	Micro-granite, rhyolite
		Quartz porphyry
		Dolerite
Neogene	Onnagawa F.	Hard mudstone
Miocene	Sunakobuchi F.	Andesite lava
		Tuffaceous siltstone, felsic tuff and mudstone
	Okuramata F.	Rhyolite lava
		Felsic tuff and welded tuff
		Andesite lava and its pyroclastic rocks
Miocene	Haginari F.	Rhyolite lava
-Paleogene		Andesite lava
Cretaceous	Taiheizan Granite	Granodiorite and granite
		Major vein
		Fault

図2 荒川地域の地質図

土谷・吉川(1994)及び大沢ほか(1981), 大沢・須田(1980), 日本鉱業協会(1968), Satori et al. (2022)を改変

2.2. 地質各説

2.2.1. 白亜系

太平山深成変成岩類

大沢ほか(1981)により Kano et al. (1964)及び加納ほか(1966)の太平山複合プルトンから第三紀花崗岩を除いたものについて命名された。太平山深成変成岩類は角閃石黒雲母花崗閃緑岩・片麻状角閃石黒雲母花崗岩及び黒雲母花崗岩を主とし、変成岩類を伴い、本岩類はそれらの相互関係から、最古期深成変成岩類と主併入岩類に分けられる(大沢ほか, 1981)。藤本(2006)は太平山深成変成岩類を花崗閃緑岩からなる西部岩体と片状花崗閃緑岩からなる東部岩体に区分した。本地域内では、最下位の主併入岩類として花崗閃緑岩が分布しているが、本地域内には隣接して東部岩体と西部岩体が分布する。東部岩体では 102 Ma (黒雲母 K-Ar 法; 河野・植田, 1966)及び 113.6 Ma (ジルコン U-Pb 法; 早坂ほか, 2015)の年代値が報告されている。また、東部岩体では 96.8 Ma (角閃石 K-Ar 法; 通商産業省資源エネルギー庁, 1986)及び 98.5 Ma (ジルコン U-Pb 法; 早坂ほか, 2015)の年代値が報告されている。

2.2.2. 新第三系

(1)萩形層

井上ほか(1956)によって命名された。安山岩溶岩からなり、模式地は秋田県北秋田郡上小阿仁村の萩形平付近である。本地域内での最大層厚は下限不明であるが 400 m 以上とされる(土谷・吉川, 1994)。本地域北方の太平山地域では第三系最下部の大又層及び後期白亜紀の太平山深成変成岩類を不整合に覆っている(大沢ほか, 1981)。本

地域内では化石は見られていないが、模式地付近では阿仁合型植物群化石を多産する (Huzioka, 1964). 太平山地域では, 21.9 Ma (全岩 K-Ar 法; 木村, 1986), 24.3 Ma (フィッシュン・トラック法; 雁沢, 1983)の放射年代値が得られている.

萩形層は本調査地域内では最下位の太平山深成変成岩類に断層及び不整合で接している. 本地域内東部に広範囲にわたって分布しているほか, 牛沢又上流に狭い範囲で分布している. 牛沢又上流の露頭では西傾斜で 3-10 cm の厚さの板状節理や, 同様に西傾斜の柱状節理が見られる.

(2)大倉又層

井上ほか(1956)によって命名された. また, 本地域内の大倉又層は井上(1960)及び白田ほか(1979)の桂淵層及び塩手沢層下部の酸性凝灰岩層を合わせたものに相当するとされる. 模式地は秋田県南秋田郡五城目町馬場目川上流大倉又沢である. 岩相については, 下部は主に黒雲母流紋岩質の溶結凝灰岩からなり, 火山礫凝灰岩, 凝灰角礫岩, 砂岩, 礫岩を挟在する. 上部は輝石安山岩の溶岩・同質の溶結凝灰岩からなり, 凝灰角礫岩, 火山礫角礫岩, 砂岩, 礫岩を挟む. 下部の流紋岩の K-Ar 年代は 21.9 Ma (木村, 1986), フィッシュン・トラック年代は 24.3 Ma (雁沢, 1983)であり, 釜淵森付近の上部の安山岩の K-Ar 年代は 15.5 Ma (木村, 1986)である. また土谷・吉川(1994)は, 牛沢又付近の軽石凝灰岩から 17.4 ± 1.4 Ma のフィッシュン・トラック年代を報告した. 萩形層を不整合で覆い, 最大層厚は 500 m である.

大倉又層は萩形層の上位の地層であり, 調査地域北東部において NW-SE 方向に連続して分布する. 岩相は酸性の軽石質火山礫凝灰岩を主とし, 細粒凝灰岩や粗粒凝灰岩, 溶結凝灰岩を含む凝灰岩類である. 灰白色の外見を呈し, 軽石や火山ガラスが主

な構成物で、細粒の粒子が多くを占める。層厚は 500 m 以上である。

(3)砂子淵層

井上ほか(1956)の命名であり、土谷・吉川(1994)によって白田ほか(1979)が塩手沢層上部、砂子淵層、鶉養層としたものが砂子淵層とされた。模式地は、秋田県河辺郡河辺町砂子淵付近である。玄武岩質溶岩、同質集塊岩、火山角礫岩、凝灰角礫岩、凝灰岩からなり、砂岩、泥岩、礫岩、酸性の凝灰岩を挟む。大倉又層の酸性凝灰岩類の上位に存在し、北西方向に連続する。土谷・吉川(1994)によると大倉又層の酸性凝灰岩類を整合で覆う。岩相は下位から順に塊状泥岩およびシルト岩、凝灰質シルト岩を狭在する酸性凝灰岩類、塊状泥岩に区分される。

砂子淵層内最下位の塊状泥岩及びシルト岩は、暗灰色を呈し、風化色は灰白色から淡褐色である。均質塊状の岩相を呈する。複数の酸性細粒凝灰岩の薄層が狭在する。層厚は 200 m 程度である。

塊状泥岩及びシルト岩の上位には凝灰岩類が存在している。凝灰岩類は軽石質火山礫凝灰岩が主な構成物であり、粗粒凝灰岩や凝灰角礫岩も存在する。軽石と火山ガラスを主な構成物とし、淡褐色を呈する。複数の泥岩の偽礫や泥岩の薄層が狭在する。凝灰岩類の上位には、凝灰質シルト岩が存在する。シルトサイズの碎屑粒子や火山ガラスから構成され、淡褐色を呈する。凝灰質シルト岩の上位には酸性の凝灰岩類が分布するが、これは先述の砂子淵層の酸性凝灰岩類と特徴を同じくするものである。砂子淵層内最上位に位置するのが塊状泥岩である。暗灰色で均質塊状であり、生痕化石が含まれる。

(4)女川層

女川層の命名は大橋良一が 1918 年に未公開報告の中で女川珩質頁岩と呼んだのが最初であり、千谷(1930)によって命名された。模式地は男鹿半島南岸の男鹿市女川の海岸である。岩相は珩質の硬質泥岩からなる。

本調査地域内西部に分布し、南北方向に連続する。珩質泥岩、塊状泥岩であり、複数の珩長質細粒凝灰岩及び粗粒凝灰岩が狭在する。珩質泥岩は暗灰色で葉理が発達しており、珩質で貝殻状断口を呈し鋭く割れ非常に堅硬である。露頭において巨視的な層理が明瞭であり、数 cm から十数 cm 度の肉眼的節理が見られる。塊状泥岩は暗灰色塊状で無層理である。特に珩質泥岩と塊状泥岩は硬軟互層をなす。特に珩質泥岩部に長径 1-2 m 程度のレンズ状コンクリーションが見られる。

(5)ドレライト岩床

砂子淵層内最下位の塊状泥岩中及び大倉又層の凝灰岩類との境界部にドレライト質の岩床が 4 ヶ所で見られた。特に比較的大規模な荒川鉦山中心部のものと、奥山川のものでは、下盤との接触部ないし、接触部近傍で周辺の泥岩等の走向傾斜と一致する走向傾斜を示す。また接触部の走向傾斜に対して垂直な節理が見られ、塊状泥岩の層理面に調和的に貫入したことを示唆している。接触部の塊状泥岩は熱によって焼かれて硬質になっている様子が観察された。顕微鏡下では、間粒状組織を呈し、カンラン石や輝石で全て緑泥石に交代されて仮像を呈する。土谷・吉川(1994)によると、カンラン石及び普通輝石が報告されており、カンラン石普通輝石ドレライトと命名されている。

2.2.3. 珪長質貫入岩類

本地域内では 3 か所で石英斑岩が、3 か所で流紋岩及びマイクロ花崗岩が貫入している。

石英斑岩は岩脈状及び岩株状をなし、調査地域北東部に位置する(図 2)。通商産業省資源エネルギー庁(1986)により、 11.3 ± 0.3 Ma の全岩 K-Ar 年代が報告されている。

流紋岩及びマイクロ花崗岩質貫入岩のうち、特に荒川上流牛沢又に位置する牛沢又岩体(通商産業省資源エネルギー庁, 1986)の形成年代として、荒川鉱床の鉱化年代と一致する 8.10 ± 0.30 Ma のジルコン U-Pb 年代が得られている(Satori et al., 2022)。牛沢又岩体以外の 2 岩体は本研究における便宜上、宮田又沢川上流に位置するものは牛沢又北岩体、牛沢又上流に位置するものは牛沢又東岩体と呼称する。これら 3 岩体は、野外における貫入の様式及び岩石の産状の類似性から、一連の火成活動で形成された岩体であると判断し、記載及び全岩元素分析、鉱物元素分析に使用した。

3. 荒川鉍床地域の金属鉍化作用

荒川鉍床は荒川鉍山として開発された 20 条以上の鉍脈からなる鉍脈型鉍床である。荒川鉍床の北端部の北方 1 km には宮田又鉍床が分布している。また、日三市鉍床が荒川鉍床東方 5 km に位置し、亀山盛鉍床が北東方 5 km に位置している。これらの鉍床群の間には牛沢又、横領森、大日三市、三元などの鉍徴地が分布し、少量の金、銀を伴う銅、鉛、亜鉛鉍床が密集して分布している(図 2)。

本地域内の鉍床は東西約 8 km 南北約 5 km にわたり分布しており、総鉍脈数は 30 条以上である。鉍脈は萩形層から砂子渕層にかけて胚胎されている。また、鉍脈のほとんどが NE 系の走向及び垂直から 55 °程度の西傾斜である。比較的大規模な鉍脈は荒川鉍床及び宮田又鉍床に集中している。荒川鉍床及び宮田又鉍床では約 26 条の鉍脈が分布するが、それらは平行脈をなし、平均銅品位は 1-3 %である。主な鉍石鉍物は黄銅鉍、黄鉄鉍、閃亜鉛鉍、方鉛鉍、黄鉄鉍であり、少量のビスマス鉍物を伴う。脈石鉍物は石英、緑泥石、赤鉄鉍、方解石である(Satori et al., 2018; Satori et al., 2022)。本地域中央部の牛沢又鉍床のイライト K-Ar 年代として、 8.1 ± 0.4 Ma の鉍化年代値が報告されている(通商産業省資源エネルギー庁, 1986)。

本地域の鉍床は、1700 年から 1965 年にかけて稼行された。明治時代以降に記録されている銅生産量は、約 75,000 t である(秋田県(1968)及び日本鉍業協会(1968)より算出)。また、本地域の埋蔵総銅量は約 200,000 t と見積もられる(日本鉍業協会(1986)より算出)。

4. 研究手法

荒川地域を対象に地質調査を行い、牛沢又岩体及び牛沢又北岩体、牛沢又東岩体から 17 試料を採取した。得られた試料のうち、典型的かつ比較的新鮮な 8 試料を対象として全岩元素分析を行い、そのうちの代表的な 4 試料を対象として鉱物元素分析を行った。

4.1. 機器分析

4.1.1. 全岩元素分析

牛沢又岩体、牛沢又北岩体、牛沢又東岩体の全岩元素組成は、肉眼観察及び顕微鏡観察によって、未変質から変質の程度が小さいものを対象に分析を行った。1 試料(試料名：UZMN227)を除く 8 試料の分析はカナダの ALS 社によって行われた(分析パッケージ名：ME-MS81d1 及び ME-4ACD81)。主要元素(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , total Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)及び親銅元素などの一部の微量元素(Li, Ni, Sc, Cu, Zn, Pb, Co, Mo, Sn, W, Ag, As, Cd, Tl)は ICP-AES, 希土類元素及びその他の微量元素(Cs, Cr, V, Ga, Rb, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, U, Th, Nb, Zr, Hf, Ta)は ICP-MS によって分析された。また、LOI は熱重量測定装置(TGA)によって分析された。一部の試料では FeO, Cl, F の分析を行った。また、1 試料(試料名：UZMN227)は秋田大学国際資源学部設置のリガク製蛍光 X 線分析装置 ZSX Primus II を用いて主要元素の分析を行うと共に、Activation Laboratories 社によって微量元素の分析が行われた。主要元素(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , total Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O ,

P₂O₅)は、標準試料を用いた検量線法によって分析を行った。標準試料は地質調査総合センター発行の標準岩石試料 JP-1, JB-1b, JH-1, JGb-1, JA-1a, JSy-1, JF-1, JG-1a, JG-2, JR-1, JCh-1 を用いた。また、強熱減量法による含水量の分析を行った。微量元素(Li, Ni, Cu, Zn, Pb, Co, Mo, Sn, W, Ag, As, Cd, Tl, Cs, Cr, V, Ga, Rb, Sr, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y, U, Th, Nb, Zr, Hf, Ta)は、ICP-MS によって分析された。

全岩硫黄含有量は地質調査総合センター地圏資源環境研究部門設置の HORIBA 製炭素・硫黄分析装置 EMIA 320V2 を用いて、酸素気流中高周波加熱燃焼－赤外線吸収法によって分析を行った。

4.1.2. 鉍物元素分析

牛沢又北岩体と牛沢又東岩体の岩石試料に含まれる角閃石、単斜輝石、斜長石、燐灰石を対象として EPMA 及び LA-ICP-MS による定量分析を行った。また、SEM-EDS によってメルト包有物中に産する硫化鉍物の元素マッピングを行った。

EPMA は地質調査総合センター地圏資源環境研究部門設置の日本電子製 JXA-8530F 型を用いた。角閃石、単斜輝石、燐灰石の分析条件は加速電圧 15 kV, 照射電流 20 nA, プローブ径 1 μm であり、標準試料は、Si: SiO₂, Ti: TiO₂, Al: Al₂O₃, Fe: Fe₂O₃, Mn: MnO, Mg: MgO, Ca: CaSiO₃, Na: albite, K: sanidine, Cr: Cr₂O₃, P: monazite, Sr・S: celestine, Y: YP₅O₁₄, La: LaP₅O₁₄, Ce: CeP₅O₁₄, F: fluorite, Cl: tugtupite を用いた。定量分析結果の補正方法は ZAF 補正を用いた。また、燐灰石の分析に際しては、P と F の特性 X 線ピークの重複を考慮して波高分光器を使用した。

LA-ICP-MS は地質調査総合センター地圏資源環境研究部門設置の装置を用いた。角

閃石, 単斜輝石, 斜長石を対象に分析を行った. レーザーアブレーション装置は Cyber Laser 製 IFRIT (Hirata and Kon, 2008) であり, 波長 260 nm のフェムト秒レーザーを用いた. また, クレーター径は 25 μm , レーザー出力は約 10 J/cm^2 , 周波数は 40 ないし 50 Hz である. He 及び Ar の混合ガスによって ICP-MS に試料が導入された. ICP-MS はアジレント・テクノロジー製 Agilent 8900 トリプル四重極 ICP-MS を用いた. 定量分析にあたっては, NIST SRM 610, NIST SRM 612, USGS BCR-2G を標準試料として検量線法によって元素濃度の算出を行った. 主要 10 元素の酸化物(SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5)を用いた 100 %正規化によって得られた SiO_2 濃度と各元素の信号強度比から, 微量元素濃度を算出した. 分析を行った微量元素は, Li, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sn, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, Pb である.

SEM-EDS は地質調査総合センター地圏資源環境研究部門設置の装置を用いた. SEM は日本電子製 JSM6610LV であり, EDS は Oxford Instruments 製 X-Max である. 分析時の加速電圧は 15 kV である.

4.2. マグマの物理化学条件の推定

マグマの温度及び圧力，含水量，酸素分圧を推定するために Ridolfi and Renzulli (2012)の角閃石温度計，圧力計，水分量計，酸素分圧計を用いた。

角閃石地質温度計は，次の式(式 1)で示される。

$$\begin{aligned}
 T(^{\circ}\text{C}) = & 17098 - (1322.3 \times \text{Si}) - (1035.1 \times \text{Ti}) - (1208.2 \times \text{Al}) - (1230.4 \times \text{Fe}) \\
 & - (1152.9 \times \text{Mg}) - (130.4 \times \text{Ca}) + (200.54 \times \text{Na}) + (29.408 \times \text{K}) \\
 & + (24.410 \times \ln P) \quad (\sigma = \pm 23.5^{\circ}\text{C})
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

角閃石圧力計は次の式(式 2)で示される。

$$\begin{aligned}
 \ln P = & 38.723 - (2.6957 \times \text{Si}) - (2.3565 \times \text{Ti}) - (1.3006 \times \text{Al}) - (2.7780 \times \text{Fe}) \\
 & - (2.4838 \times \text{Mg}) - (0.6614 \times \text{Ca}) + (0.2705 \times \text{Na}) + (0.1117 \times \text{K}) \\
 & (\sigma = \pm 11.5\%)
 \end{aligned}
 \tag{式 2}$$

角閃石水分量計は次の式(式 3)で示される。

$$\begin{aligned}
 \ln H_{2O_{\text{melt}}} = & -65.907 + (5.0981 \times \text{Si}) + (3.1308 \times \text{Ti}) + (4.9211 \times \text{Al}) + (4.9744 \times \text{Fe}) \\
 & + (4.6536 \times \text{Mg}) + (1.0018 \times \text{Ca}) - (0.7890 \times \text{Na}) - (0.539 \times \text{K}) \\
 & + (0.4642 \times \ln P) \quad (\sigma = \pm 0.78 \text{ wt. } \%)
 \end{aligned}
 \tag{式 3}$$

角閃石酸素分圧計は次の式(式 4)で示される。

$$\begin{aligned}
 \Delta \text{NNO} = & 214.39 - (17.042 \times \text{Si}) - (26.080 \times \text{Ti}) - (16.389 \times \text{Al}) - (18.397 \times \text{Fe}) \\
 & - (15.152 \times \text{Mg}) + (0.2162 \times \text{Ca}) + (6.1987 \times \text{Na}) + (14.389 \times \text{K}) \\
 & (\sigma = \pm 0.37 \text{ log units})
 \end{aligned}
 \tag{式 4}$$

5. 荒川銅鉱床の形成に関連した貫入岩

5.1. 牛沢又岩体

5.1.1. 概要

牛沢又岩体は荒川上流牛沢又に位置し、NW-SE 方向に約 1.8 km、NE-SW 方向に約 200-500 m の楕円形の貫入岩体であり、牛沢又沢で滝を形成する(図 2)。大倉又層の軽石質火山礫凝灰岩を貫く。岩体の北西端部は鍋倉山山頂付近に分布し、貫入岩相の最大標高は約 460 m である。岩体の南東端部は荒川上流日暮沢に分布している。最低標高は牛沢又沢の 150 m である。岩体上部を切る沢において断続的に泥岩亜円礫を含む軽石質火山礫凝灰岩のルーフが認められた。貫入岩の主部はマイクロ花崗岩からなり、露頭では不規則な柱状節理がしばしば発達している(図 3a)。暗緑色から暗灰色のエンクレーブを含む。

5.1.2. 岩相

(1)貫入岩主部

角閃石マイクロ花崗岩からなり、岩体中心部の比較的新鮮なものは塊状緻密で灰白色を呈する(図 3b)。肉眼的には融食形を呈する石英及び短柱状の斜長石の斑晶が認められる。苦鉄質鉱物は散点的に分布している。顕微鏡下では斑状組織を示し、石基部分は細粒完晶質であり、細粒な石英などに充填されており、フェルシティック組織に類似する産状を示す(図 4a & b)。斑晶として産する短柱状の斜長石はアルバイト式双晶及び累帯構造を呈する。石英は明瞭な融蝕形を示し、外縁部にはメルト包有物が含まれる。角閃石は緑泥石に交代され長柱状の仮象を呈する。石基には少量の黒雲母が

存在する。石基部分の結晶粒間や一部の斜長石の内部は鉄を含むスメクタイトなどの粘土鉱物に交代され、全体的に茶褐色を呈する。チタン磁鉄鉱中には稀に液滴状の黄鉄鉱が含まれる。副成分鉱物として燐灰石及びジルコンが含まれる。

(2)エンクレーブ

直径 1 cm->1 m 程度の暗緑色-暗灰色のエンクレーブが含まれている。暗緑色を示す細粒苦鉄質なエンクレーブの外縁部は境界が明瞭で、幅 1-2 mm 程度の珪質なハローが存在する(図 3c)。顕微鏡下では完晶質であり、長径 0.3-0.5 mm の長柱状の自形斜長石の粒間をやや変質した角閃石、石英、磁鉄鉱が充填し、間粒状組織をなす。角閃石は多くが緑泥石化している。斜長石は中心部がスメクタイトなどの粘土鉱物に交代されて茶褐色を呈する。特徴的に、長さ 2 cm に達する長柱状ないし樹枝状を呈する角閃石に富むデイサイト質エンクレーブが産する(図 3d)。本岩体に産するエンクレーブは全体的に比較的強い熱水変質を被っている。

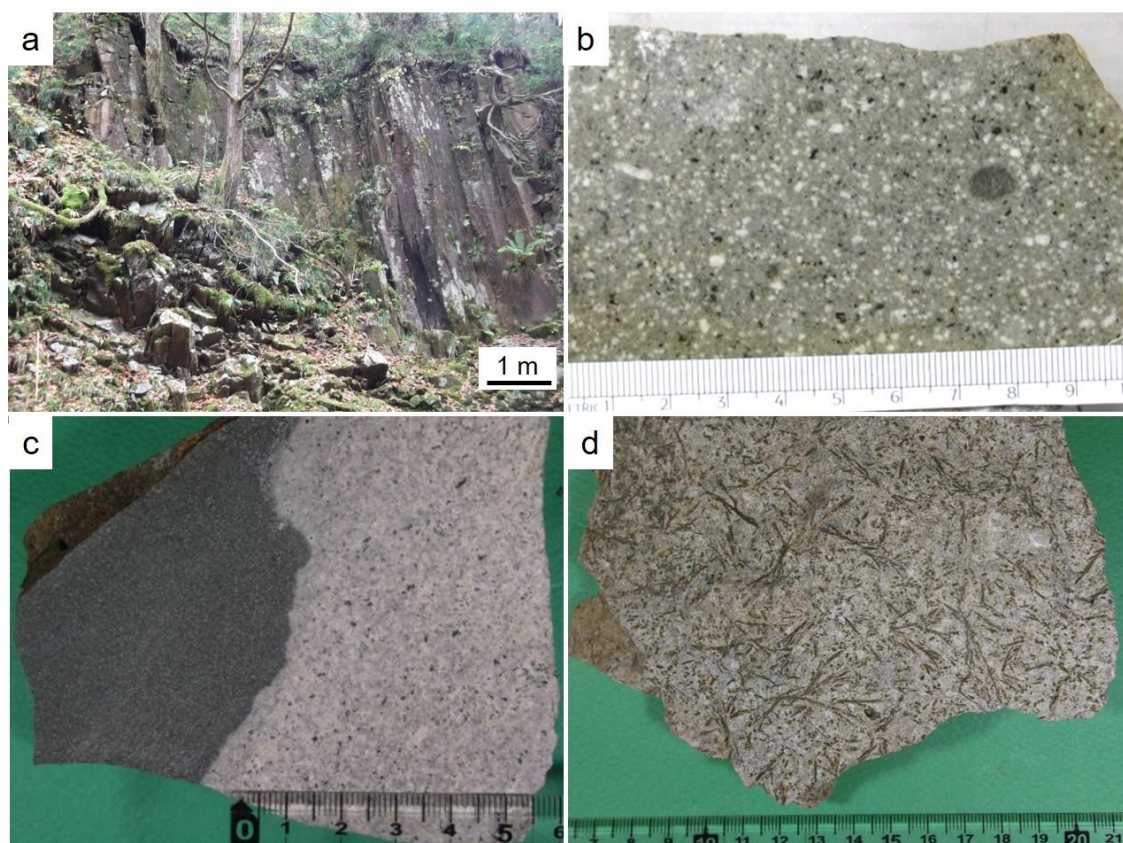


図3 牛沢又岩体の露頭及び岩石の産状

- a. 柱状節理を呈する牛沢又岩体の露頭. b. 牛沢又岩体を構成するマイクロ花崗岩.
 c. マイクロ花崗岩中に含まれる玄武岩質エンクレーブ. 外縁部に優白色な反応縁が見られる. d. 長柱状ないし樹枝状の角閃石を含むデイサイト質エンクレーブ

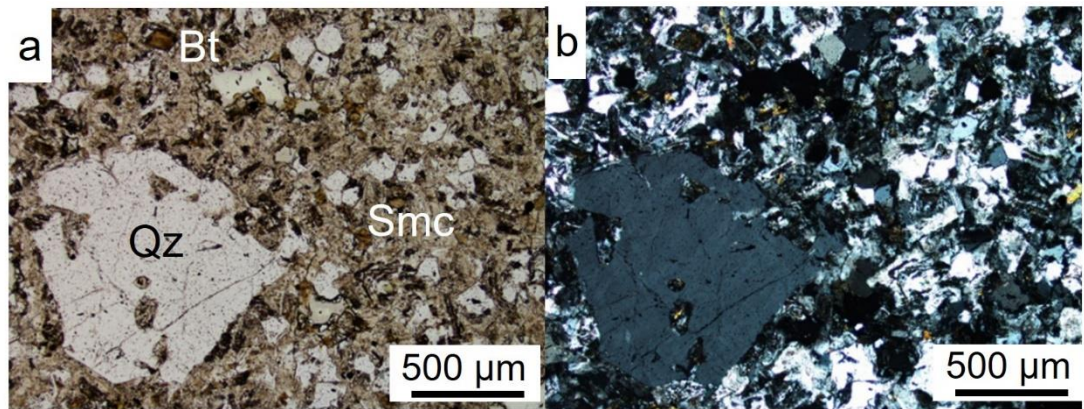


図4 牛沢又岩体を構成するマイクロ花崗岩の偏光顕微鏡写真

石英斑晶(Qz)は融蝕形を呈する。石基は細粒完晶質なフェルシティック組織を呈する。稀に黒雲母(Bt)を含む。結晶粒間などがスメクタイト(Smc)変質を受けており、オープンニコルでは淡茶色を呈する。a. オープンニコル。b. クロスニコル

5.2. 牛沢又北岩体

5.2.1. 概要

牛沢又北岩体は宮田又沢川上流に位置し，砂子淵層の凝灰岩類を貫く．NE-SW 方向に約 1.2 km，NW-SE 方向に約 300 m の分布を示し，北端及び東端は断層で切られている．(大沢ほか，1981；図 2)．楕円体ないし不定形を示す暗灰色－淡黒色のエンクレーブを含む(図 5a)．

5.2.2. 岩相

(1)貫入岩主部

角閃石マイクロ花崗岩からなり，灰白色で塊状緻密である(図 5c)．部分的にミアロリティック組織を呈する．顕微鏡下では斑状完晶質な組織を呈し，石基部分は細粒完晶質である．直径 0.8-2 mm の短柱状斜長石及び石英の斑晶と直径 0.05-0.2 mm の石英，長柱状斜長石，角閃石，チタン磁鉄鉱からなる石基から構成される(図 6a & b)．斑晶として産する短柱状の斜長石はアルバイト式双晶及び累帯構造を呈する．角閃石は石基中に産し，概ね新鮮である．チタン磁鉄鉱及び磁鉄鉱の多くが結晶粒間に産し，稀に液滴状の黄鉄鉱，磁硫鉄鉱が含まれる．副成分鉱物として燐灰石，ジルコンが含まれる．一部の斜長石の中心部や累帯構造の一部などの相対的に An 値が高い部分や石基中の微細な石英などの粒間は，鉄を含むスメクタイトなどの粘土鉱物に交代されている．

(2)暗灰色デイサイト質エンクレーブ(角閃石デイサイト)

角閃石デイサイトからなるエンクレーブの外縁部は肉眼的には波状を呈し、やや不明瞭な境界を持つ(図 5 d). 苦鉄質なエンクレーブにみられる珪質なハローは認められない。肉眼的には塊状緻密である。顕微鏡下では細粒完晶質であり、やや大きく、斑状に含まれる短柱状斜長石(1-2 mm), 長柱状斜長石(0.3-0.8 mm), 石英, 角閃石, チタン磁鉄鉱からなる(図 6c & d). 副成分鉱物として燐灰石, ジルコンが含まれるほか, 稀に微小な単斜輝石が角閃石中に含まれる。燐灰石は主に石基中に含まれ, 細粒の石英及びカリ長石が充填する石基中に自形で含まれる(図 7 a & b). 長柱状の自形斜長石の粒間を角閃石, 石英, チタン磁鉄鉱が充填し, 間粒状組織を呈する。チタン磁鉄鉱及び磁鉄鉱の多くが結晶粒間に産し, 稀に液滴状の黄鉄鉱, 磁硫鉄鉱が含まれる。斜長石は, 斑状に含まれる短柱状斜長石と主に石基を充填する長柱状斜長石の両者でアスペクト比が特徴的に異なる。一部の斜長石の中心部や累帯構造の一部などの相対的に An 値が高い部分や石基の微細な鉱物の粒間は, 鉄を含むスメクタイトなどの粘土鉱物に交代されている。特徴的に直径 1 cm 程度で, 内部が空洞な杏仁状の構造がエンクレーブの表面に分布している(図 5b). また, 顕微鏡下では直径 1-2 mm の杏仁状組織がみられ, 内部は石英で充填されている。この石英中には, ハライトを含む多相流体包有物が含まれる。

(3)淡黒色安山岩質エンクレーブ(角閃石安山岩)

角閃石安山岩からなるエンクレーブの外縁部は肉眼的に明瞭な境界を示し, 外縁部は, 細粒化している(図 5e). 顕微鏡下では細粒完晶質であり, 不規則な方向性をもつ

て分布する長柱状斜長石(0.3-0.5 mm)の粒間に角閃石及び石英が充填する間粒状組織を呈する(図 6e & d). チタン磁鉄鉱及び磁鉄鉱が結晶粒間や角閃石を交代して産する. 一部の角閃石や斜長石のコアや石基の結晶粒間は緑泥石及び鉄を含むスメクタイトなどに交代されている.

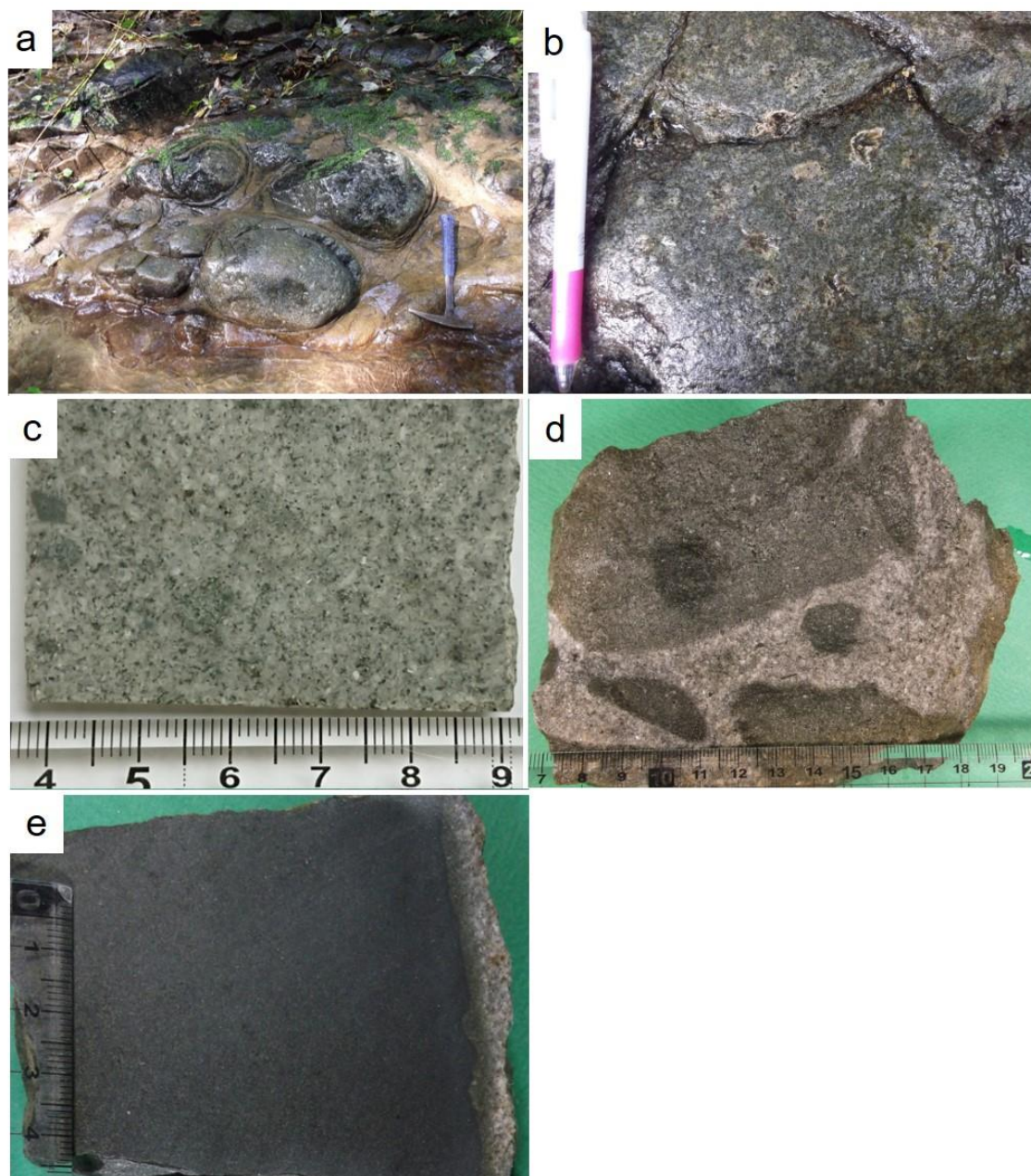


図5 牛沢又北岩体の露頭及び岩石の産状

a. エンクレーブを含むマイクロ花崗岩質貫入岩の露頭。風化や水流によってエンクレーブが洗い出されている。b. 洗い出されたエンクレーブの表面に見られる1 cm程度の杏仁状組織。c. 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩。d. マイクロ花崗岩中に含まれる暗灰色デイサイト質エンクレーブ。明瞭な急冷周縁相や反応縁は見られない。e. マイクロ花崗岩に含まれる淡黒色安山岩質エンクレーブ。外縁部に細粒暗色な急冷周縁相が見られる。

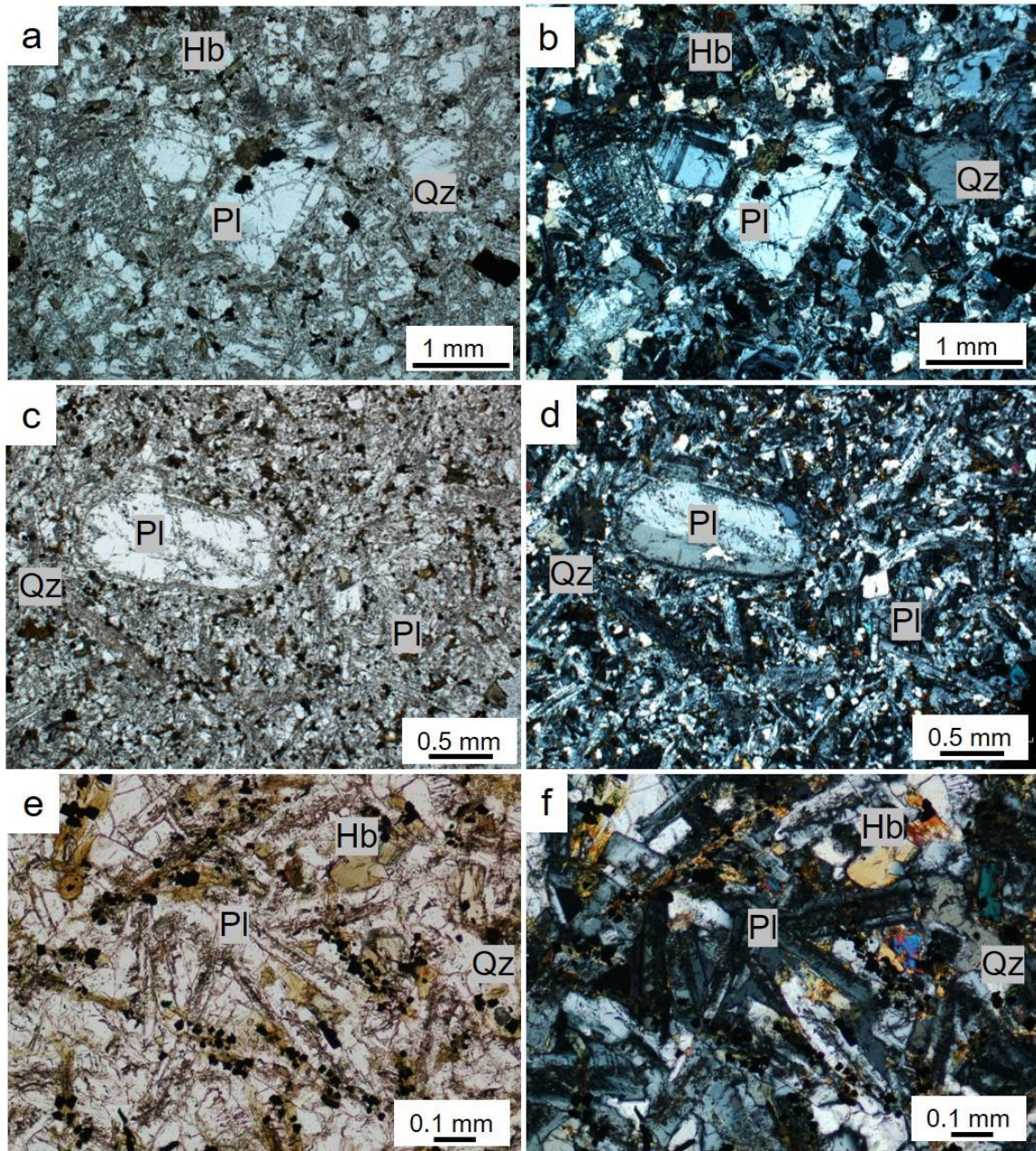


図6 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩及びエンクレーブの偏光顕微鏡写真

a & b. 細粒完晶質な組織を呈するマイクロ花崗岩. 石基には細粒な石英及び角閃石 (Hb)が含まれる. 特徴的に短柱状の斜長石(Pl)が斑状に含まれる. c&d. 細粒完晶質な組織を呈する暗灰色デイサイト質エンクレーブ. 特徴的に短柱状の斜長石が斑状に含まれ, 石基は長柱状の斜長石が多量に含まれ, その粒間を角閃石及び石英が充填し, 間粒状組織を呈する. e&f. 細粒完晶質な組織を呈する淡黒色安山岩質エンクレーブ. 長柱状の斜長石の粒間に角閃石及び石英, 磁鉄鉱が充填し, 間粒状組織を呈する.

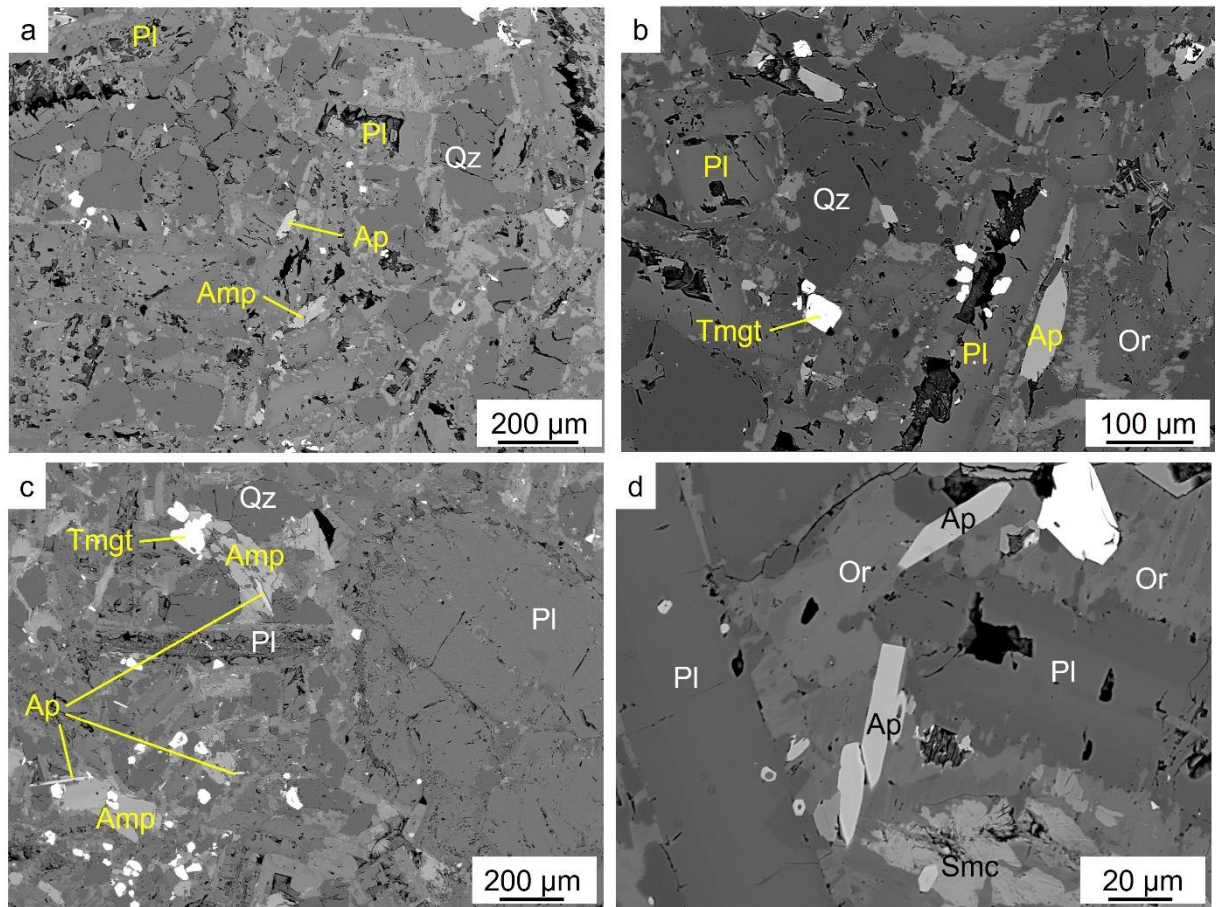


図 7 牛沢又北岩体のマイクロ花崗岩質貫入岩及び貫入岩に含まれるデイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石の産状

a & b. 石英，角閃石，斜長石，正長石(Or)からなる細粒完晶質な石基中に楕円形及び長柱状の燐灰石(Ap)が産する． c & d. 石英，角閃石，斜長石，正長石からなる細粒完晶質な石基中に楕円形及び長柱状の燐灰石(Ap)が産する．石基は一部が鉄を含むスメクタイト(Smc)に交代されている．

5.3. 牛沢又東岩体

5.3.1. 概要

牛沢又沢上流部に存在する萩形層の安山岩溶岩と大倉又層の溶結凝灰岩が接する $N60^{\circ}E48^{\circ}W$ の正断層に沿って分布する。分布は NE-SW 方向に約 400 m, NW-SE 方向に約 50 m であり、北西端は断層に接している(図 2)。この断層では萩形層の安山岩溶岩に接して極小規模な範囲に分布するシルト岩と本岩体の接触部が観察され、下盤のシルト岩側から順に厚さ約 2 cm の赤褐色を呈すカタクレーサイト、幅 30-40 cm 程度の著しくスメクタイト化した流紋岩、厚さ 2 cm 程度の板状に破断された流紋岩が観察された。特に板状部に変形構造を呈す流紋岩が存在することから、断層運動の時期と貫入の時期は同一であることが示唆される。流紋岩は、塊状緻密であり、直径 10 cm 内外の明瞭な柱状節理が発達している(図 8a)。柱状節理は $N20^{\circ}W55^{\circ}W$ の傾きを示す直径 1-40 cm のエンクレーブが比較的多量に含まれる(図 8b)。

5.3.2. 岩相

(1)斜長流紋岩

灰白色で塊状緻密である(図 8c)。肉眼的には直径 1 mm 程度の斜長石及び石英の斑晶が見られる。顕微鏡下では半晶質である。斑晶は斜長石と石英からなり、共に融食形を呈する(図 9a & b)。少量の角閃石を伴うが変質している。石基部分は脱ハリによって微細な石英やカリ長石から構成されると共に、放射状のスフェルライトが多数形成されている。また、斜長石及び石英斑晶の外縁部にもスフェルライトが見られる。

(2)暗緑色玄武岩質エンクレーブ(単斜輝石含有角閃石斑レイ岩)

露頭では直径 1-40 cm 以上の大きさで比較的多量に含まれ、形状は球状ないし楕円体である。外縁部に厚さ 1-2 mm 程度の灰白色で珪質な反応縁が見られる(図 8c & d)。肉眼的には細粒緻密である。顕微鏡下では長柱状の斜長石の間隙に角閃石が他形で充填する間粒状組織を示す(図 9c & d)。Relict 状の単斜輝石が角閃石中に存在しており、単斜輝石は角閃石に交代されている(図 9e & f)。角閃石中には液滴状の斑銅鉱や黄銅鉱が含まれる。また、角閃石に含まれるガラス質メルト包有物中に斑銅鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱が含まれる産状(図 10a & b)や、ガラス質メルト包有物中に斑銅鉱、黄銅鉱が磁鉄鉱と共に含まれる産状も見られる(図 10c & d)。結晶粒間に黄鉄鉱が存在している。長柱状斜長石や角閃石の粒間には、周囲の変質を伴わない自形性の高い自生の緑泥石が存在する。

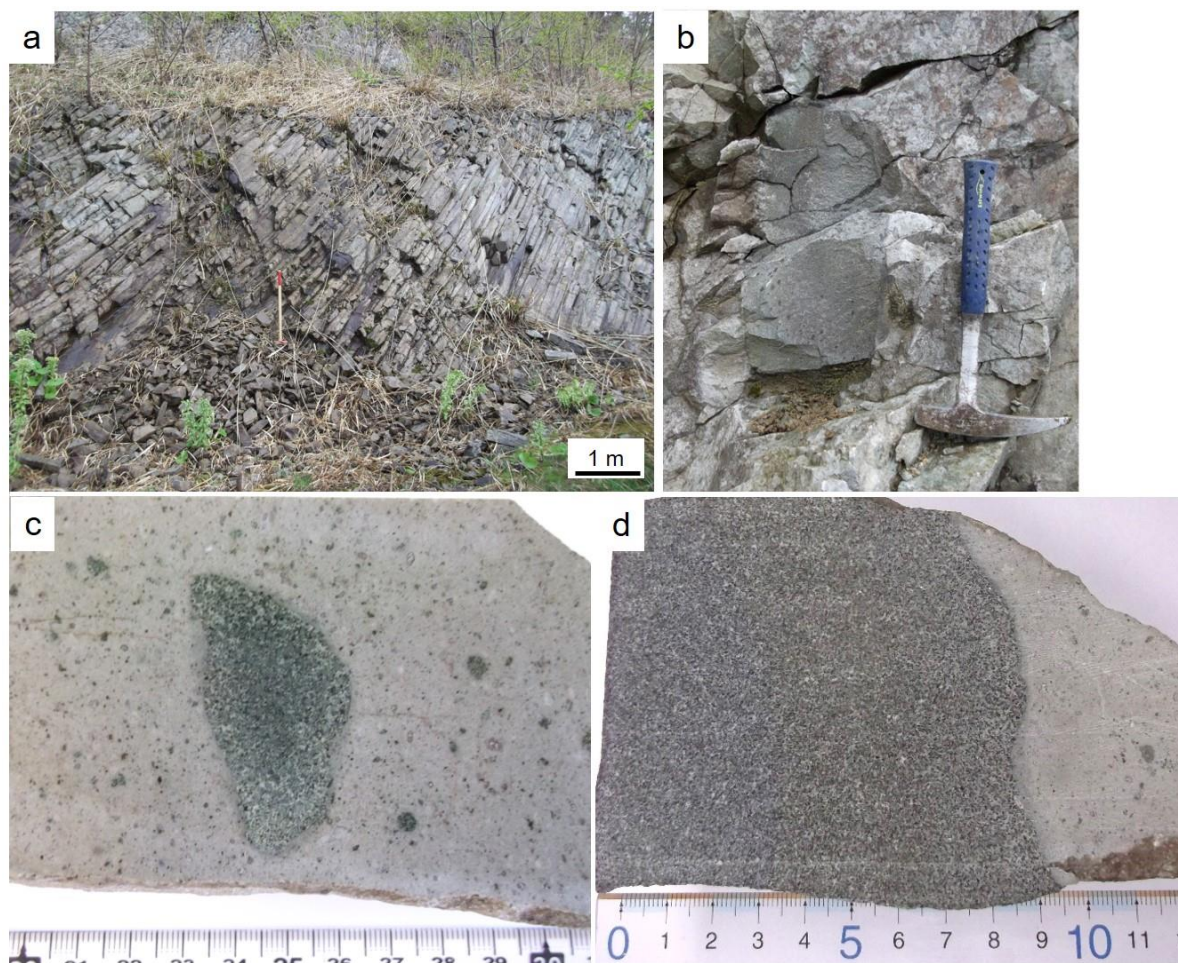


図8 牛沢又東岩体の露頭及び岩石の産状

a. 柱状節理を呈する流紋岩の露頭. b. 流紋岩中に産する暗緑色玄武岩質エンクレーブ. c. 流紋岩及びエンクレーブ. 緻密な灰白色流紋岩中に液滴状のエンクレーブが含まれる. d. 明瞭な外縁部を呈する暗緑色玄武岩質エンクレーブ. 外縁部に優白色の反応縁が認められる.

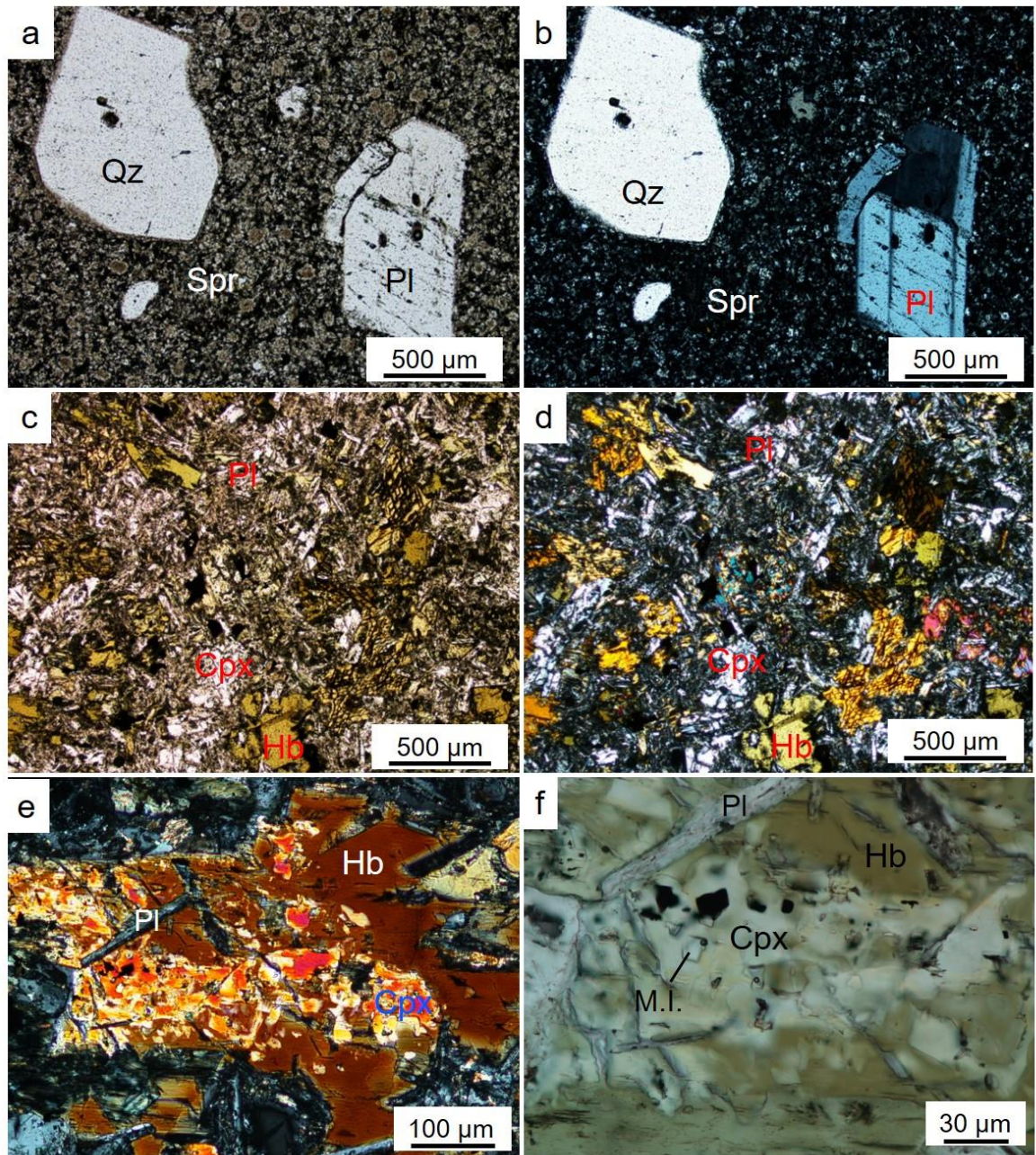


図9 牛沢又東岩体を構成する流紋岩及びエンクレーブの偏光顕微鏡写真

a & b. 牛沢又東岩体を構成する流紋岩. 半晶質であり, 斑晶はほとんどが斜長石と石英である. 斑晶の外縁部や石基中には, 脱ハリによって放射状のスフェルライト (Spr) が形成されている. c & d. 細粒完晶質な組織を呈する暗緑色玄武岩質エンクレーブ. 主に長柱状の斜長石とその粒間を充填する他形の角閃石からなる. また, 少量の単斜輝石 (Cpx) が含まれる. e. 角閃石に交代される relict 状の単斜輝石. f. 単斜輝石中にはガラスと気泡からなるメルト包有物 (M.I.) 及び磁鉄鉱が含まれる.

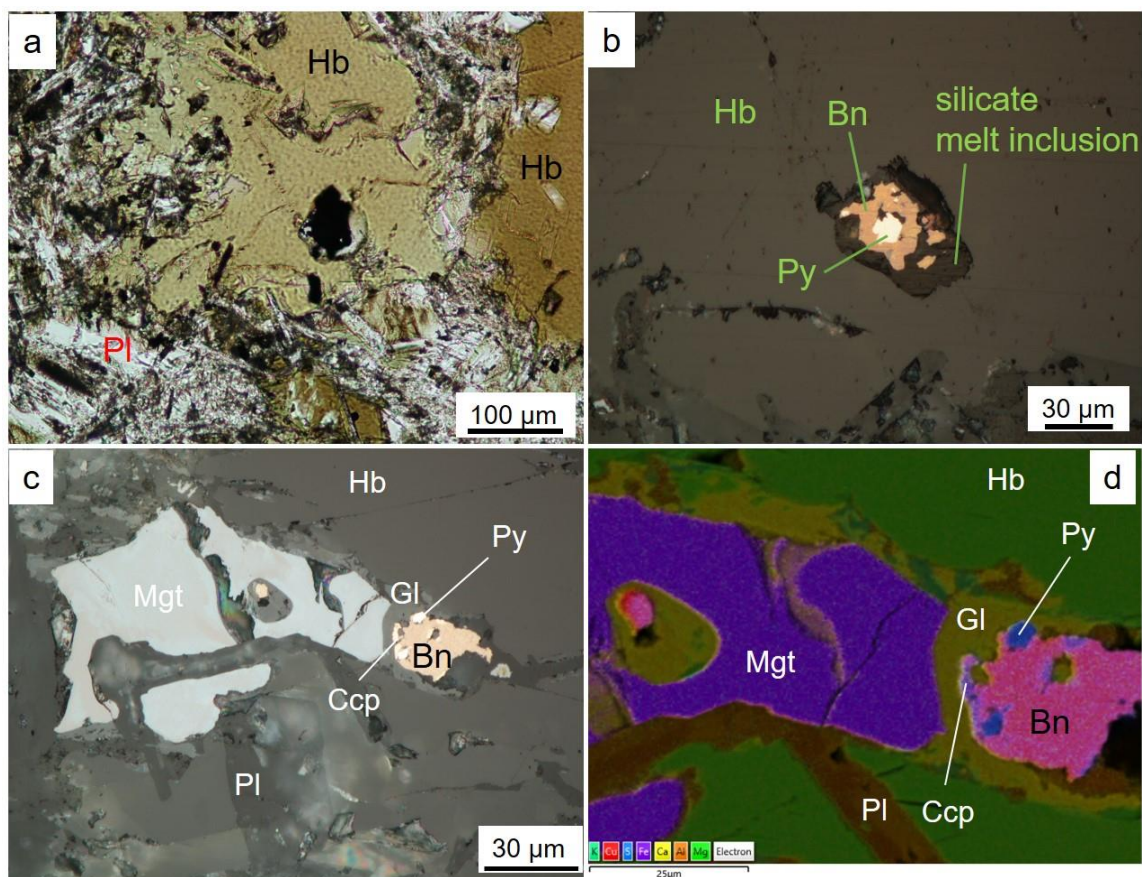


図 10 牛沢又東岩体のエンクレーブに含まれる銅硫化鉱物の産状

- a. 他形の角閃石中に含まれる硫化鉱物を含むメルト包有物. b. 珪酸塩メルト包有物中に含まれる斑銅鉱(Bn)及び黄鉄鉱(Py) (写真 a の反射拡大像). c. 角閃石中に含まれるガラス(Gl), 斑銅鉱, 黄銅鉱(Ccp), 黄鉄鉱, 磁鉄鉱(Mgt)からなる包有物. d. SEM-EDS による写真 c の元素マッピング像. 斑銅鉱, 黄銅鉱, 黄鉄鉱が磁鉄鉱, ガラスと共に角閃石中に包有されている.

6. 岩石試料の全岩元素組成

6.1. 主要元素組成

牛沢又岩体及び、牛沢又北岩体、牛沢又東岩体を構成する珪長質岩及びそれらに含まれるエンクレーブの全岩元素組成を表 1 に示す。なお、鉄は total Fe₂O₃ として示している。顕微鏡観察によって変質の程度が小さいと判断された試料を分析に使用したものの、元素組成からも変質による元素移動などの影響が小さいことを確認するために Miyashiro (1975) によるアルカリ移動判定図を用いて確認を行った(図 11)。K に代表される LIL 元素は流体によって移動しやすい性質を示すが、アルカリ移動判定図では、化学的に変質の影響が少ないと判断される非変質領域に全試料がプロットされ、変質による元素移動量は比較的少ないと判断される。

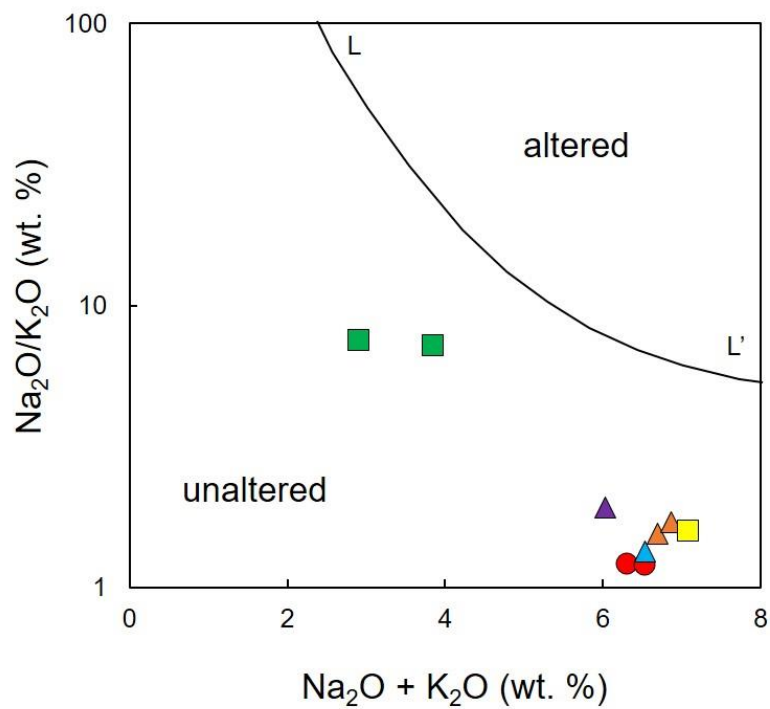
X 軸に SiO₂ wt. %, Y 軸に各主要元素酸化物をとったハーカー図を図 12 に示す。全ての主要酸化物において牛沢又岩体、牛沢又北岩体、牛沢又東岩体の三岩体の主部をなす珪長質岩は牛沢又北岩体の 1 試料を除いて類似したプロットとなり、主要元素組成はほとんど同様である。この例外的な 1 試料は、牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブとの中間的な値を示す。次に牛沢又北岩体と牛沢又東岩体のエンクレーブに注目すると、両者のエンクレーブは三岩体の珪長質岩とは異なりそれぞれ独立したプロットとなった。三岩体の珪長質岩と牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブはそれぞれのハーカー図において端成分に位置するが、牛沢又北岩体の 2 種類のエンクレーブは TiO₂, MnO, P₂O₅ を除きそれぞれ両者の中間的な組成を示す。また、連続的な組成トレンドを示さなかった 3 元素のうち、TiO₂ 及び P₂O₅ は玄武岩質エンクレーブ以外の試料においては連続的な組成トレンドを示す。

TAS 図(Total Alkalis versus Silica (TAS) diagram: Le Maitre et al., 1989)へのプロットの結果, 三岩体の珪長質岩は全て流紋岩の領域となり, 既に顕微鏡観察で得られている組織及び構成鉱物から流紋岩及びマイクロ花崗岩と命名された(図 13). また, エンクレーブについては, 牛沢又北岩体の 2 試料がデイサイト及び安山岩の組成領域にプロットされ, 牛沢又東岩体の 2 試料は玄武岩及び玄武岩質安山岩となった. また, 全試料がサブアルカリ岩系に該当する(図 13). ASI (Aluminium Saturation Index)の分類図では貫入岩類の全てと牛沢又北岩体のデイサイト質エンクレーブは peraluminous の領域にプロットされ, 牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブと牛沢又北岩体の安山岩質エンクレーブは metaluminous の領域にプロットされた(図 14). 角閃石に富む玄武岩質エンクレーブが metaluminous な組成を示すことは, 角閃石が $ASI < 1$ であるため(Hine et al., 1978), 鉱物組成と調和的である.

表 1 荒川地域に産する珪長質貫入岩及びエンクレーブの全岩元素組成

岩体名	牛沢又岩体		牛沢又北岩体				牛沢又東岩体		
	マイクロ花崗岩質貫入岩		マイクロ花崗岩質貫入岩		デイサイト質 エンクレーブ	安山岩質 エンクレーブ	流紋岩質 貫入岩	玄武岩質 エンクレーブ	
試料名	UZM150a	UZM150b	UZMN1	UZMN230	UZMN229c	UZMN227	UZME	UZME MME1	UZME MME2
wt. %									
SiO ₂ (wt.%)	73.90	73.70	70.20	72.80	66.10	61.34	74.20	48.40	50.70
TiO ₂	0.25	0.25	0.49	0.32	0.64	0.97	0.23	0.77	0.81
Al ₂ O ₃	13.10	12.80	14.65	12.85	14.50	15.61	12.85	16.90	16.80
t-Fe ₂ O ₃	1.97	2.23	3.77	3.25	6.20	7.97	2.25	9.89	9.51
MnO	0.03	0.03	0.07	0.06	0.11	0.01	0.06	0.24	0.21
MgO	1.44	1.36	1.37	0.67	1.66	2.93	0.55	7.36	6.70
CaO	1.02	1.03	2.28	1.43	2.72	4.15	1.39	8.21	8.85
Na ₂ O	3.47	3.57	4.12	4.27	3.76	3.95	4.31	3.33	2.56
K ₂ O	2.85	2.95	2.65	2.50	2.80	2.06	2.70	0.46	0.34
P ₂ O ₅	0.05	0.05	0.15	0.09	0.25	0.28	0.03	0.12	0.12
LOI	2.45	2.23	1.56	0.57	1.88	2.81	0.69	3.30	3.61
Total	100.53	100.20	101.31	98.81	100.62	102.08	99.26	98.98	100.21
Fe ₂ O ₃	1.11	0.79	1.78	n.a.	n.a.	n.a.	1.26	3.20	3.20
FeO	0.77	1.03	1.79	n.a.	n.a.	n.a.	0.89	6.02	5.68
Li (ppm)	<10	<10	<10	10	<10	4.5	10	30	10
Cs	0.68	0.59	0.33	0.54	0.36	0.33	0.66	1.02	1.08
Sc	8	8	12	9	16	n.a.	9	31	27
Ga	17.8	14.4	18.2	18.1	18.4	16.1	18.3	19.7	16.5
Co	41	2	33	3	8	12	35	44	34
Cr	<10	<10	<10	10	10	10	10	120	110
Ni	4	<1	1	2	2	0.9	3	37	32
V	17	16	52	23	92	93	28	295	273
Cu	3	3	<1	2	2	3.4	2	65	106
Zn	38	35	29	37	48	41	49	87	98
Rb	65.5	60.4	47.1	55.6	49.8	24	76.8	11.7	10
Sr	90.4	79.3	198.5	156	199.5	226	156	231	250
Ba	540	483	544	603	625	333	661	111.5	113
La	26.8	22.9	22.5	27	26.7	18.5	28.1	6.5	8.4
Ce	59.4	51.4	49.6	59.4	59.3	38.3	63.8	15.8	20.4
Pr	7.08	6.34	5.96	7.19	7.52	5.9	7.59	2.01	2.73
Nd	28.9	24.3	25.2	29.1	31.2	24.5	31.5	9.8	12.4
Sm	6.35	5.81	5.64	6.28	7.08	5.9	6.72	2.46	3.21
Eu	1.24	1.06	1.6	1.58	1.62	1.62	1.38	0.95	0.93
Gd	6.08	5.77	5.95	6.45	7.13	7.2	6.9	2.56	3.31
Tb	1.02	0.98	0.92	1.07	1.12	1.2	1.14	0.43	0.55
Dy	6.47	6.33	5.63	6.68	7.46	7.4	6.79	2.62	3.47
Ho	1.37	1.35	1.22	1.43	1.59	1.5	1.52	0.59	0.78
Er	4.22	3.77	3.74	4.22	4.61	4.3	4.36	1.7	2.21
Tm	0.65	0.62	0.54	0.65	0.66	0.5	0.7	0.23	0.29
Yb	4.43	4.03	3.8	4.4	4.33	3.3	4.83	1.61	1.9
Lu	0.7	0.63	0.6	0.67	0.69	0.4	0.75	0.25	0.3
Y	40.4	35.6	35.1	40.6	44.3	45.1	43.4	16.3	19.6
U	2.12	1.79	1.34	1.92	1.96	0.3	2.2	0.3	0.44
Th	7.83	6.43	5.17	6.99	6.22	2.7	8.29	1.08	1.63
Pb	7	7	3	5	3	2.8	5	4	3
Nb	9.6	8.4	8.8	9.5	9.2	0.8	10.5	1.7	2.7
Zr	237	194	227	211	136	12	253	67	72
Hf	6.1	5.8	5.4	5.6	3.8	0.6	6.6	1.5	2.1
Ta	1.2	0.5	0.9	0.8	0.9	<0.1	1.1	0.2	0.1
Mo	1	<1	<1	1	<1	0.08	<1	<1	<1
Sn	2	2	1	2	5	<1	2	1	1
W		<1		1	6	<0.1			<1
Ag	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.05	<0.5	<0.5	<0.5
As	<5	<5	<5	<5	<5	0.5	<5	<5	<5
Cd	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.2	<0.5	<0.5	<0.5
Tl	<10	<10	<10	<10	<10	0.1	<10	<10	<10
Cl	140	170	250	n.a.	n.a.	n.a.	150	400	340
F	480	520	330	n.a.	n.a.	n.a.	280	560	500
S	25	n.a.	22	n.a.	26	19	22	212	314
Sr/Y	2.2	2.2	5.7	3.8	4.5	4.1	3.6	14.2	12.8
Rb/Sr	0.7	0.8	0.2	0.4	0.2	0.1	0.5	0.1	0.0
Rb/Ba	0.12	0.13	0.09	0.09	0.08	0.07	0.12	0.10	0.09
A/CNK	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8
A/NK	1.5	1.4	1.5	1.3	1.6	1.8	1.3	2.8	3.7

炭化タングステン製の粉碎装置を使用した試料には W の混染が生じているため、該当する試料の W の値は示していない。n.a.: not analyzed



- 牛沢又岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 デイサイト質エンクレーブ
- ▲ 牛沢又北岩体 安山岩質エンクレーブ
- 牛沢又東岩体 流紋岩質貫入岩
- 牛沢又東岩体 玄武岩質エンクレーブ

図 11 アルカリ移動判定図(Miyashiro, 1975)

図中の L-L'境界線より Na₂O/K₂O 及び Na₂O + K₂O が低い試料は、アルカリ元素の大きな移動が少なく、変質作用による元素の移動が少ないことを示す。

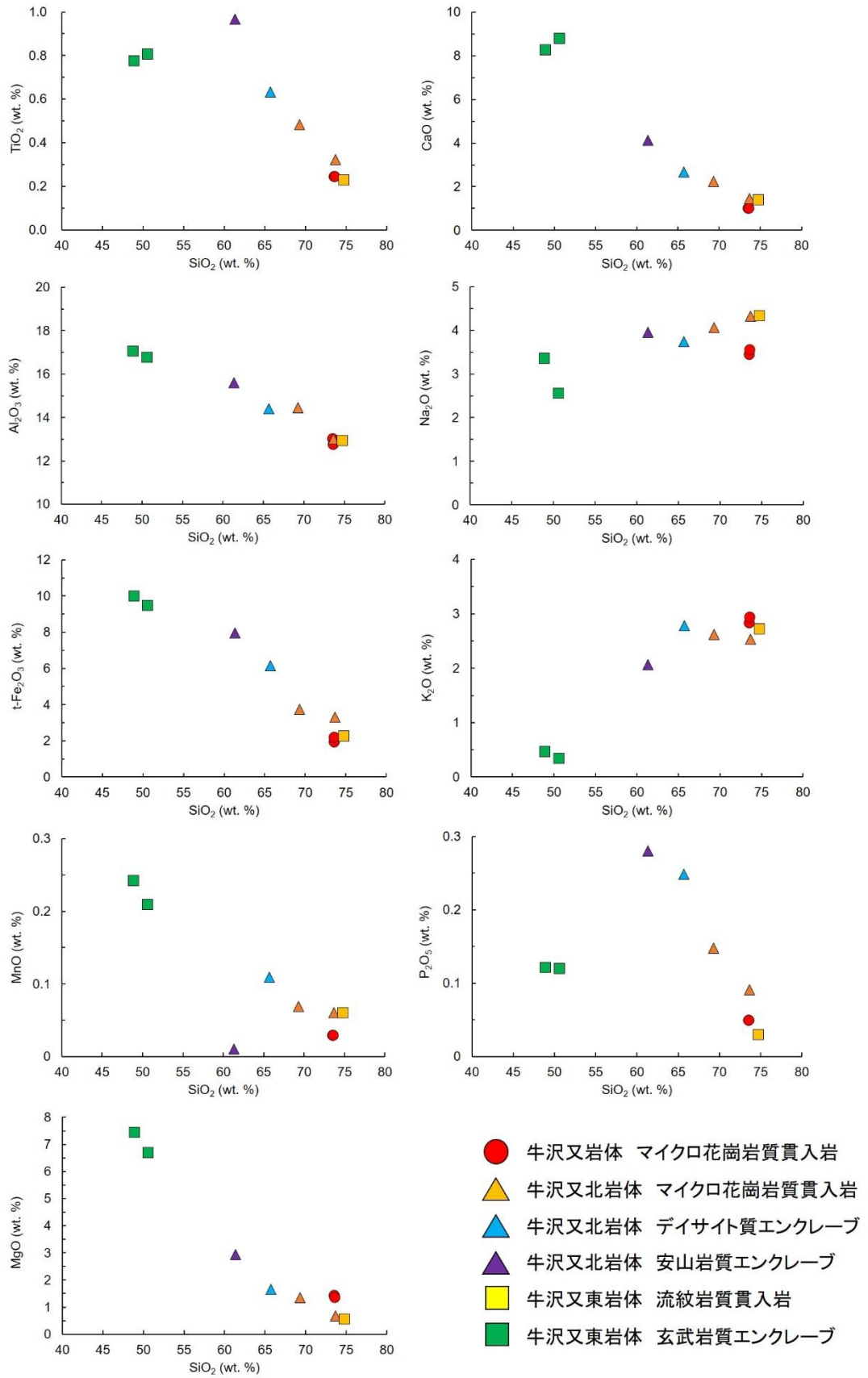


図 12 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブのハーカー図

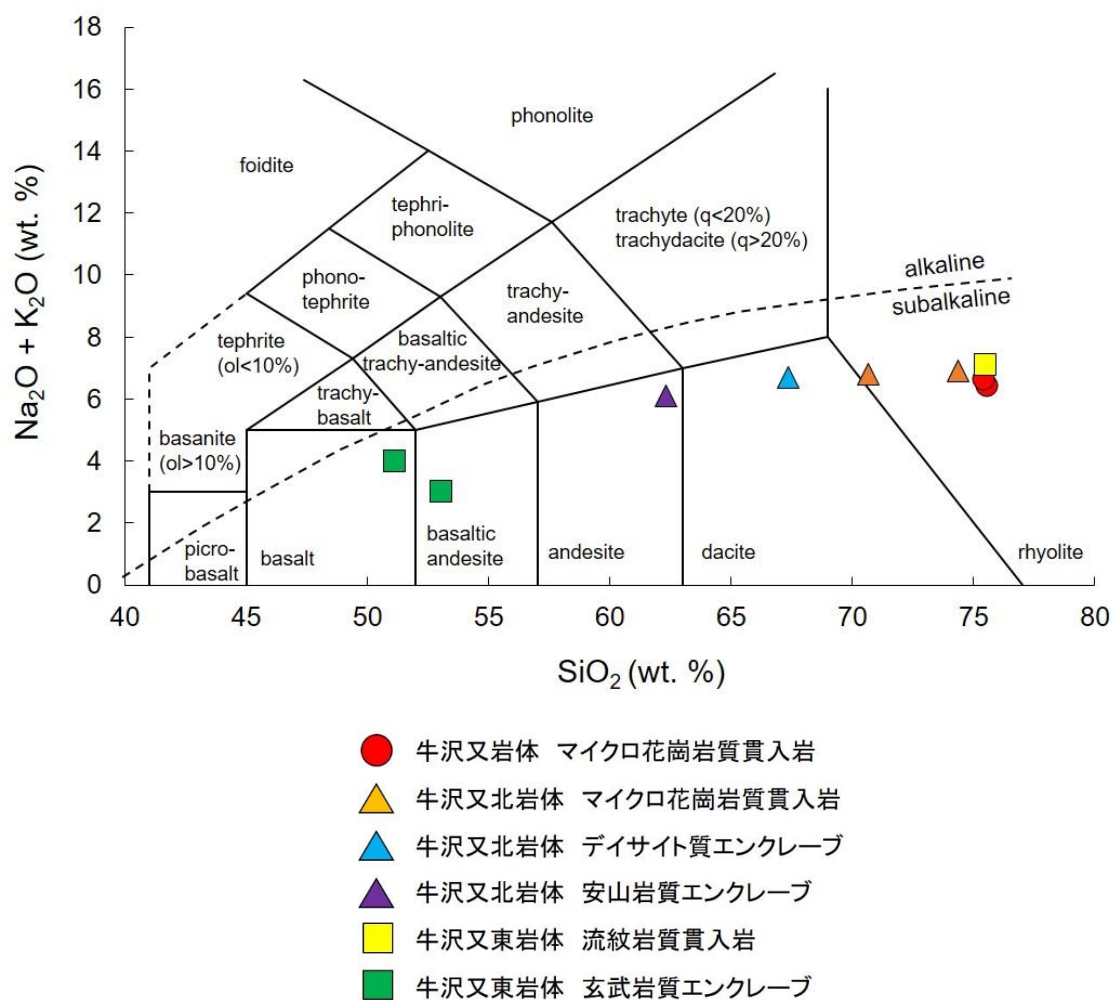
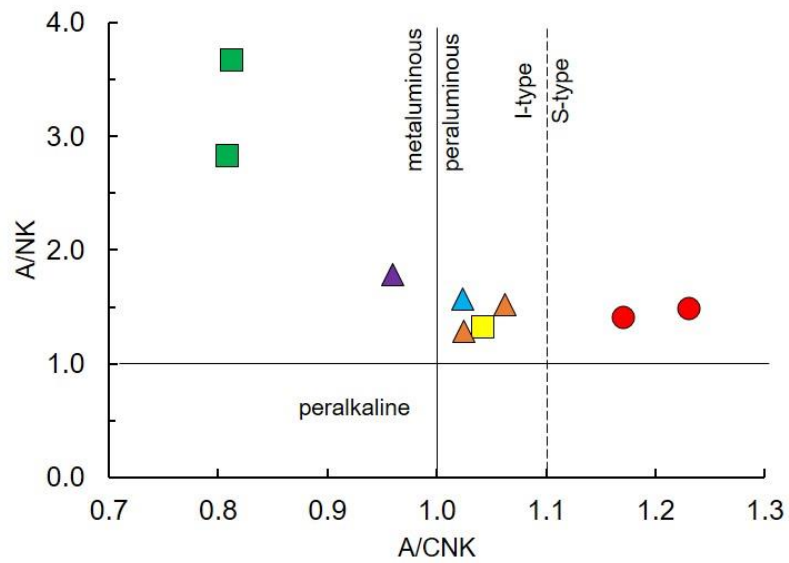


図 13 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブの TAS 図(Le Maitre et al., 1989)

alkaline/subalkalin 岩系の境界は Irvine and Baragar (1971)に基づく。



- 牛沢又岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 デイサイト質エンクレーブ
- ▲ 牛沢又北岩体 安山岩質エンクレーブ
- 牛沢又東岩体 流紋岩質貫入岩
- 牛沢又東岩体 玄武岩質エンクレーブ

図 14 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブのアルミナ飽和度

Iタイプ及びSタイプ花崗岩の境界線は Chappell and White (1974)に基づく。

6.2. 微量元素組成

ここでは、微量元素の中でも Ba, Sr, Rb, V, Y, Nb, Zr, Cu, Pb, Zn, S について述べる。これらの SiO₂ 対微量成分の変化図(図 15)では、Ba, Sr, Rb, V, Zn は比較的直線的な変化を示し、Ba, Rb は SiO₂ 含有量の増加に比例して増加する傾向が認められ、Sr, V, Zn は SiO₂ の増加に比例して減少する傾向が認められる。Zr は安山岩質エンクレーブを除いて概ね SiO₂ 含有量に比例して増加する傾向を示す。Nb は玄武岩質エンクレーブ及び安山岩質エンクレーブで低い含有量(0.8-2.7 ppm)を示し、その他の珪長質岩では高い値(8.4-10.5 ppm)を示す。また、Rb/Sr と SiO₂ の変化図では貫入岩は相対的に分化の進んだ傾向を示し、三岩体で類似している(図 15)。一方、牛沢又東岩体の暗緑色エンクレーブは相対的に分化の進んでいない傾向を示し、牛沢又北岩体のデイサイト質エンクレーブは中間に位置する。Sr/Y は、玄武岩質エンクレーブで相対的に高い値(12.8, 14.2)を示すものの、アダカイトに比較して低い Sr/Y と高い Y 含有量を示し、ウェッジマントル由来の普遍的な島弧安山岩一流紋岩の組成を示す(図 16)。Cu は三岩体のマイクロ花崗岩及び流紋岩とデイサイト質エンクレーブは 4 ppm 以下であるのに対して、玄武岩質エンクレーブは 65 ppm 及び 106 ppm 含まれ、銅硫化鉱物(斑銅鉱及び黄銅鉱)を含むことと調和的である。Zn は Cu と同様に玄武岩質エンクレーブのみ含有量が高い結果となった。Pb はマイクロ花崗岩及び流紋岩で各エンクレーブに比べて含有量が高い傾向が認められるが、牛沢又北岩体のマイクロ花崗岩の 1 試料を含むその他の試料は相対的に低い値を示す。S は玄武岩質エンクレーブを除く全試料が比較的低い含有量(19-26 ppm)を示す。玄武岩質エンクレーブの 2 試料は比較的高い含有量(212, 314 ppm)を示す。S は玄武岩質エンクレーブを除く全試料が比較

的低い含有量(19-26 ppm)を示す。玄武岩質エンクレーブの2試料は比較的高い含有量(212, 314 ppm)を示す。全体的にS含有量は硫化鉱物の含有量と調和的であり、Cu含有量と比例関係を示す(図17)。

牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブ2試料の元素組成をN-MORB (Saunders and Tarney, 1984; Sun, 1980)及び島弧玄武岩(岩手火山; Togashi et al., 1992)で規格化したスパイダー図に示す。これらの試料は、N-MORBに比較してLIL元素及び、U, Th, Laなどのイオン半径の大きいHFS元素に富み、Nb, Ta, Hf, Tiにやや乏しいパターンを示す(図18a)。また、島弧玄武岩で規格化したパターンはNb, Sr, Tiにやや乏しいものの、概ねフラットなパターンを示し、島弧玄武岩に調和的な元素組成を示す(図18b)。また、比較的高いZr/Nb値(26.7, 39.4)及び比較的高いRb/Ba値(0.09, 0.10)を示す(表1; 図15)。

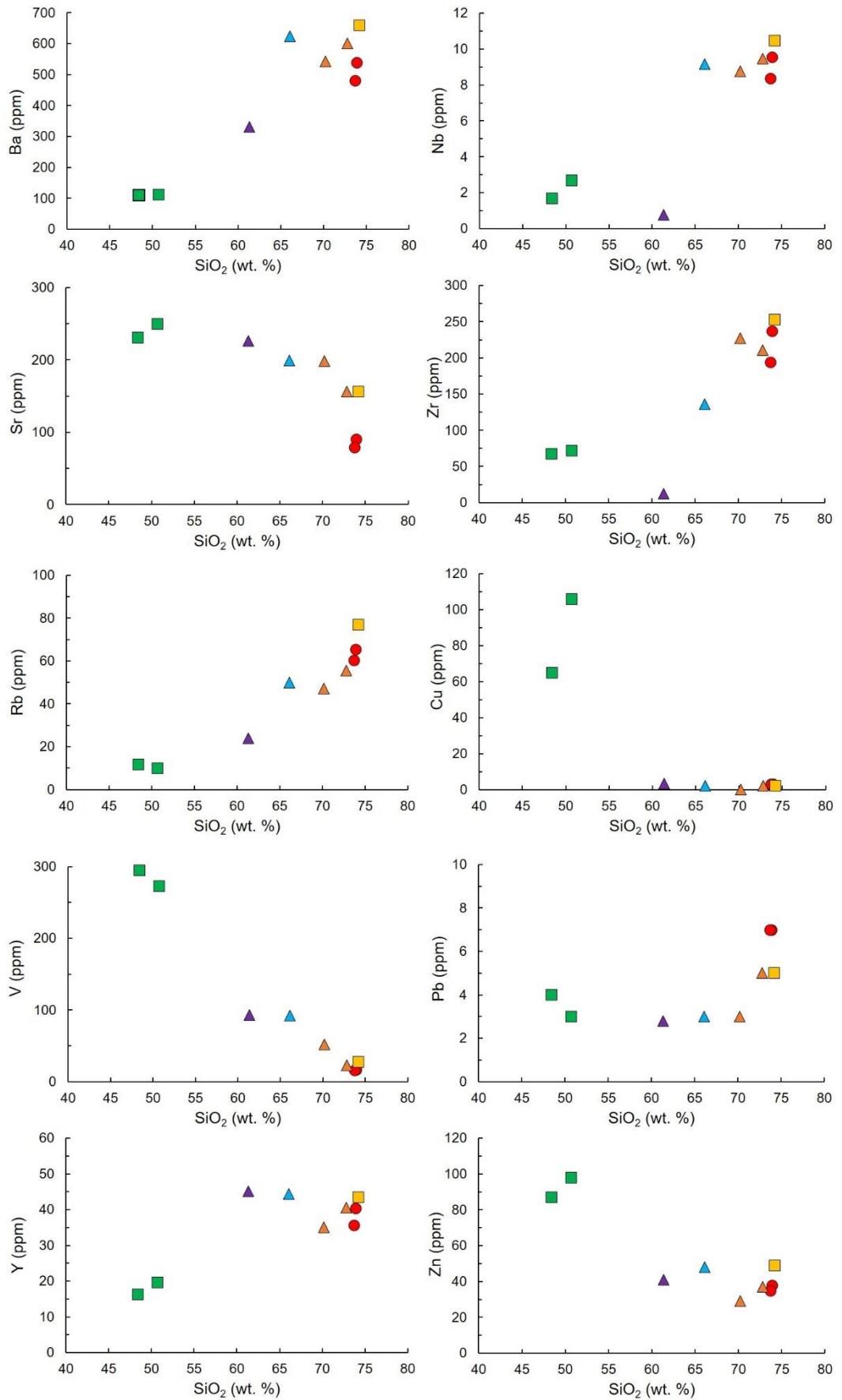


図 15 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブの微量元素変化図

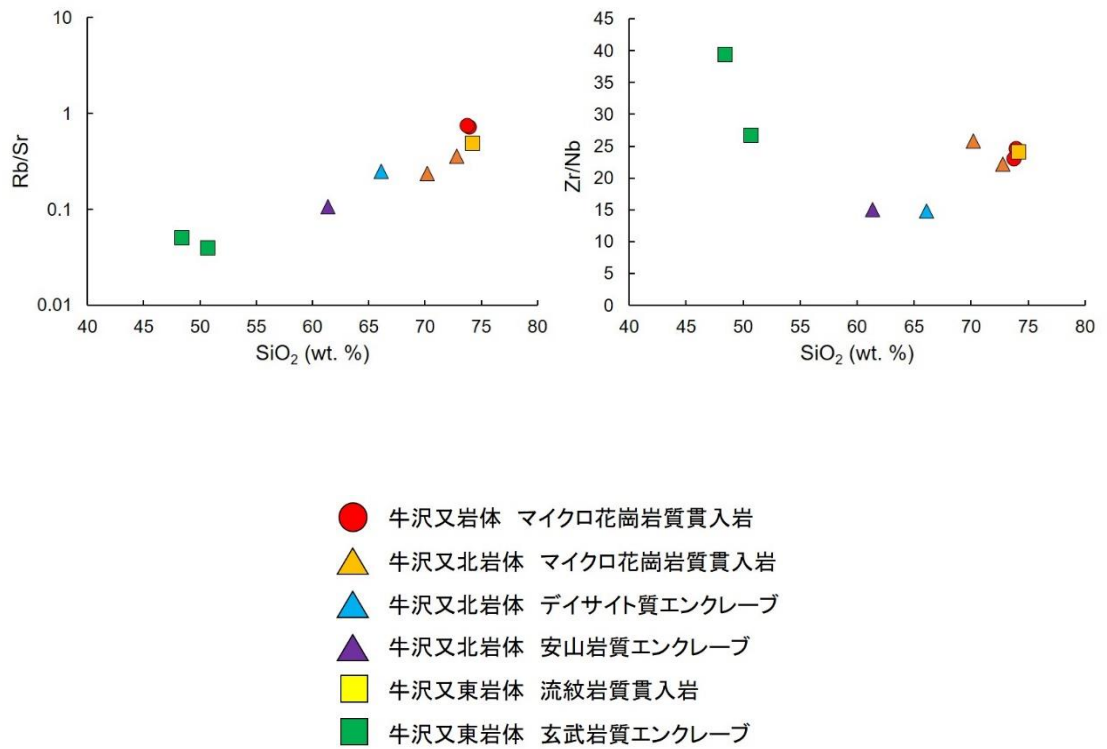


図 15 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブの微量元素変化図(続き)

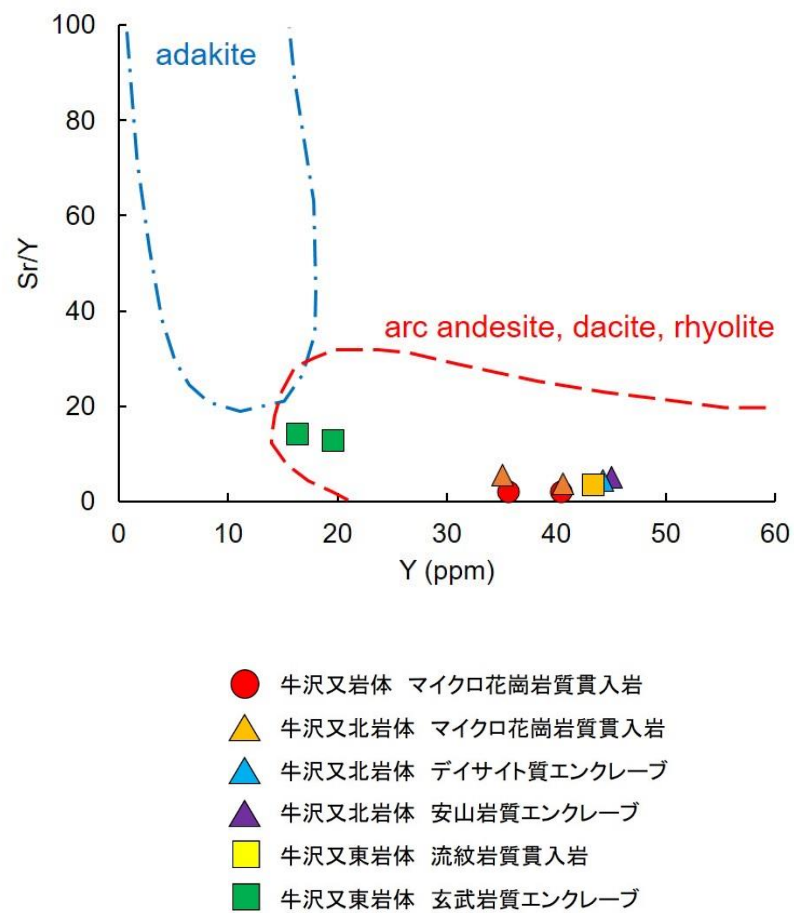
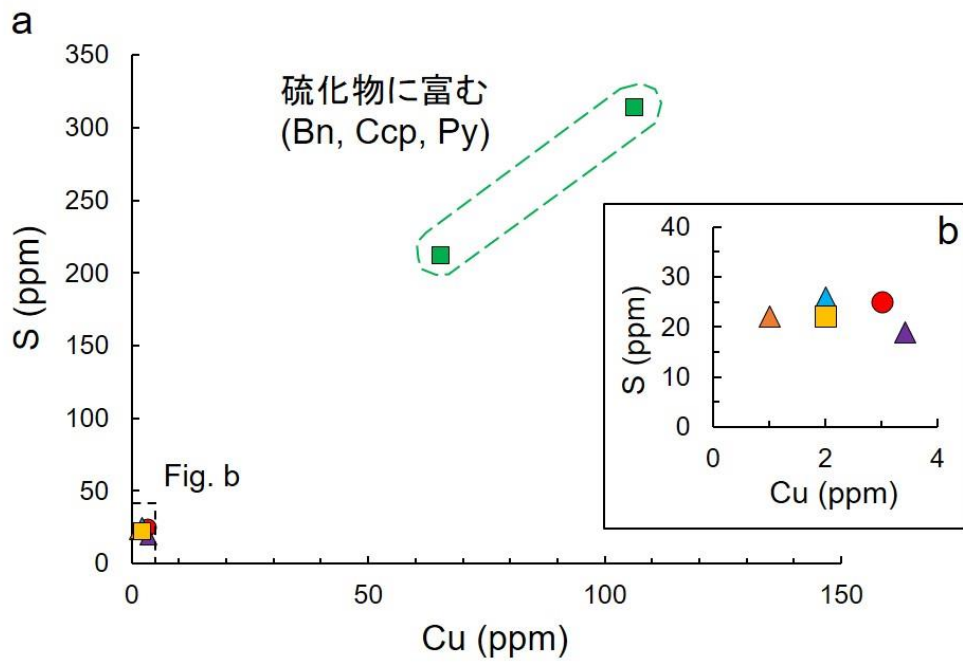


図 16 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブの Sr/Y vs. Y 図



- 牛沢又岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 マイクロ花崗岩質貫入岩
- ▲ 牛沢又北岩体 デイサイト質エンクレーブ
- ▲ 牛沢又北岩体 安山岩質エンクレーブ
- 牛沢又東岩体 流紋岩質貫入岩
- 牛沢又東岩体 玄武岩質エンクレーブ

図 17 a. Cu vs. S 図. b. 低含有量領域の拡大図

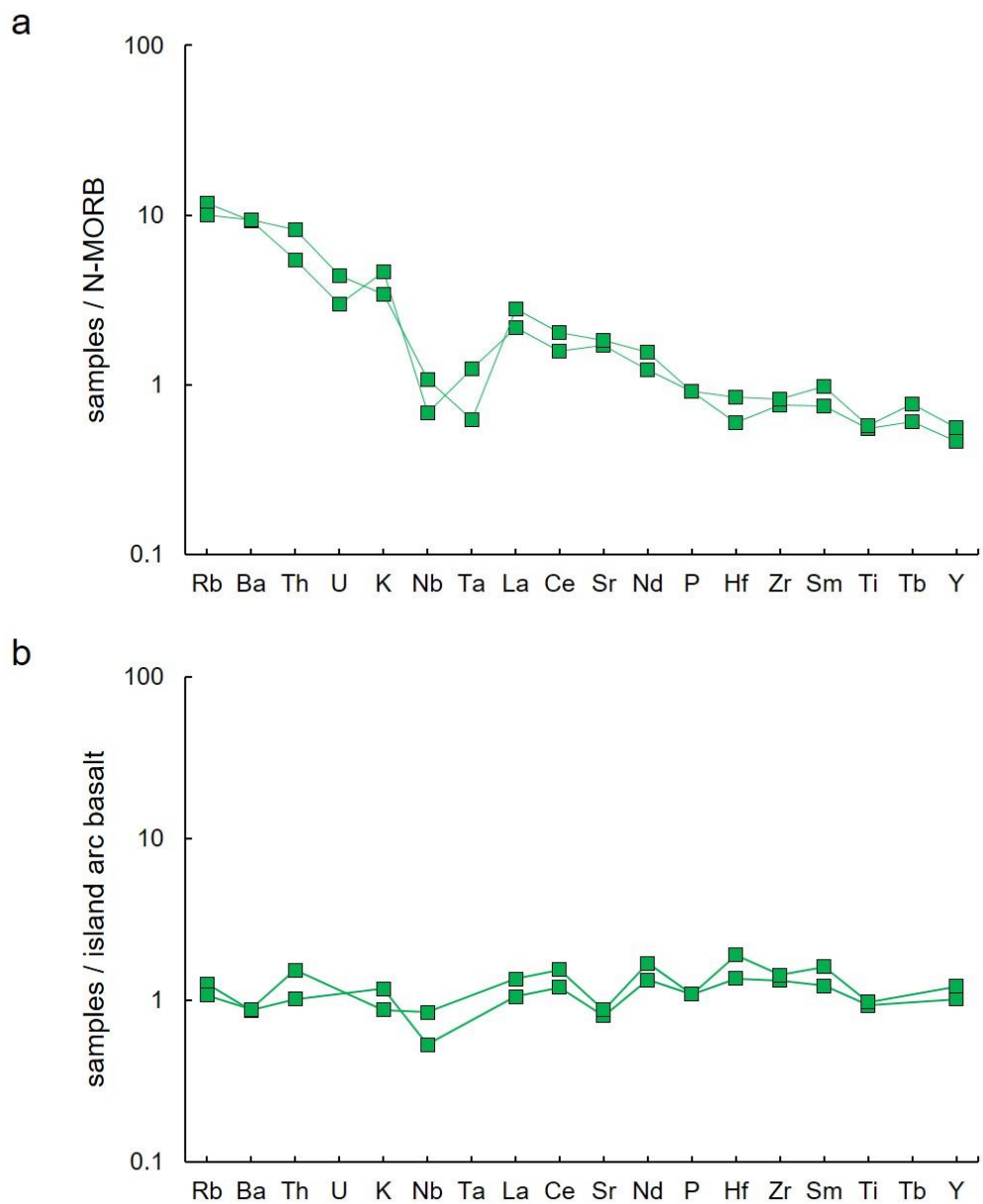


図 18 牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブのスパイダー図

a. N-MORB で規格化したスパイダー図. b. 島弧玄武岩で規格化したスパイダー図.

6.3. 希土類元素組成

9 試料の希土類元素含有量を Boynton (1984) の C1 コンドライトの値を用いて規格化したパターンを図 19 に示す。牛沢又岩体、牛沢又北岩体、牛沢又東岩体のマイクロ花崗岩及び流紋岩、牛沢又北岩体のデイサイト質エンクレーブの希土類元素パターンは類似している。それぞれ軽希土に富み、Eu に負異常を示す。牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブは全体的に希土類元素の含有量が低い。特に軽希土類が比較的少なく、明瞭な Eu の負異常を示さない緩やかなパターンを示す。日本弧の玄武岩組成 (Fujimaki and Kurasawa, 1980) と比較すると高アルミナ玄武岩と調和的な希土類元素パターンを示す(図 19)。

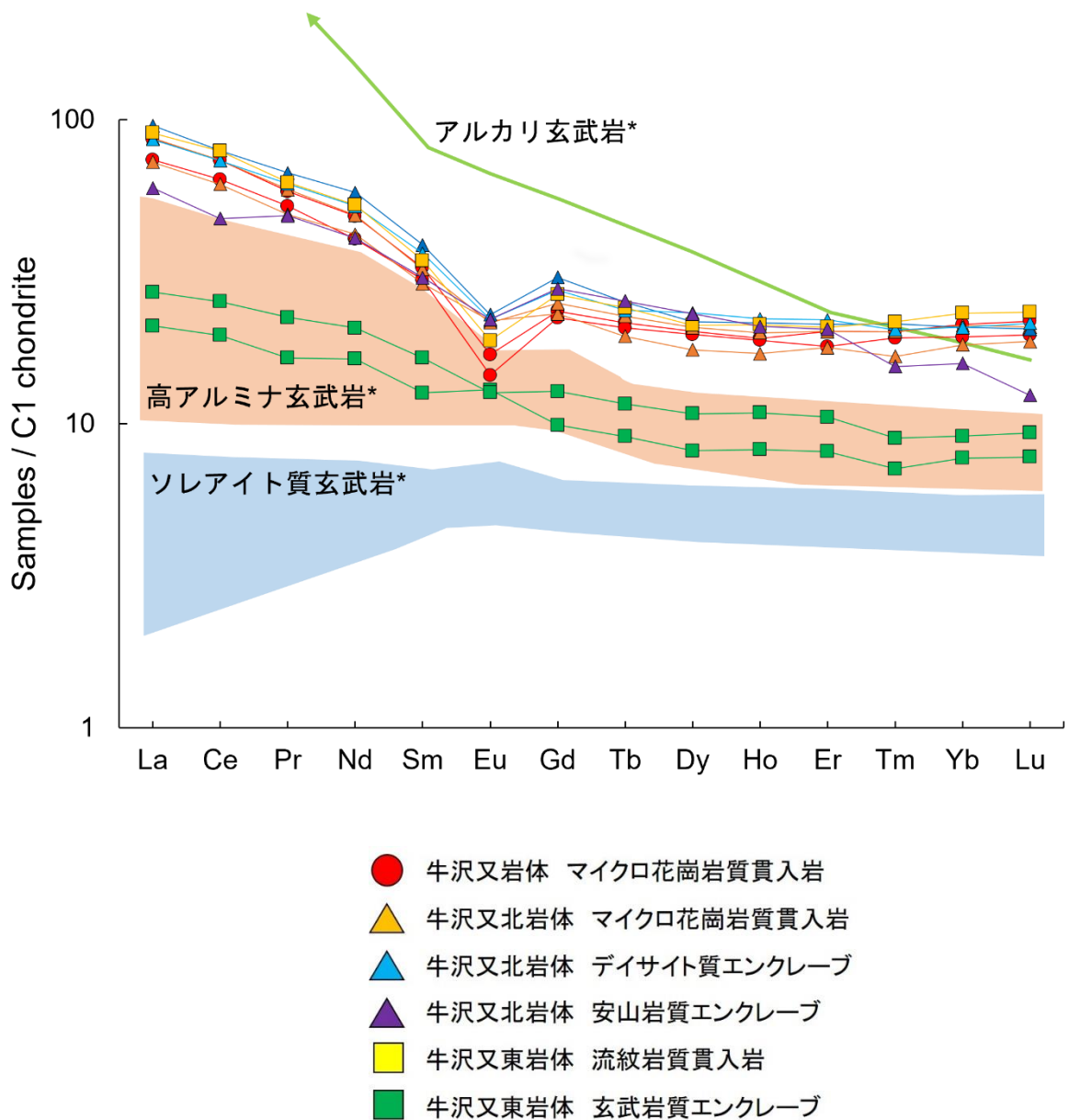


図 19 荒川地域の珪長質貫入岩及びエンクレーブのコンドライト規格化希土類元素パターン

*Fujimaki and Kurasawa (1980)による日本弧の玄武岩組成.

7. 鉍物元素組成

7.1. 角閃石

牛沢又北岩体のマイクロ花崗岩及びデイサイト質エンクレーブ、安山岩質エンクレーブ、牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる角閃石を対象に EPMA 及び LA-ICP-MS による分析を行った。

マイクロ花崗岩質貫入岩に含まれる角閃石は、Si (apfu) 7.15-7.70, Mg # 0.67-0.78 を示す(表 2 ; 図 20a)。また、角閃石の鉍物組成式における A サイトに含まれる Na + K 原子数は、0.16-0.43 であり、hornblende-edenite-tschermakite-pargasite の 4 成分を端成分とした分類図(Leake, 1978)では、hornblende に近い組成を示す(図 20b)。Hawthorne et al. (2012)による分類では、ほとんどが magnesio-ferri-hornblende に分類される。Cu 含有量は 0.7-2.5 ppm である(表 3)。

デイサイト質エンクレーブに含まれる角閃石は、Si (apfu) 7.12-7.35, Mg # 0.68-0.72 を示す(表 4 ; 図 20a)。また、角閃石の鉍物組成式における A サイトに含まれる Na + K 原子数は、0.27-0.43 であり、hornblende-edenite-tschermakite-pargasite の 4 成分を端成分とした分類図(Leake, 1978)では、hornblende に近い値を示す(図 20 b)。Hawthorne et al. (2012)による分類では、magnesio-ferri-hornblende に分類される。Cu 含有量は 0.7-1.7 ppm である(表 5)。

安山岩質エンクレーブに含まれる角閃石は、Si (apfu) 7.04-7.64, Mg # 0.65-0.72 を示す(表 6 ; 図 20a)。また、角閃石の鉍物組成式における A サイトに含まれる Na + K 原子数は、0.19-0.48 であり、hornblende-edenite-tschermakite-pargasite の 4 成分を端成分とした分類図(Leake, 1978)では、hornblende に近い値を示す(図 20b)。Hawthorne et al.

(2012)による分類では, magnesio-ferri-hornblende に分類される.

玄武岩質エンクレーブに含まれる角閃石は, Si (apfu) 6.52-7.20, Mg # 0.65-0.85 を示す(表 7; 図 20a). また, 角閃石の鉱物組成式における A サイトに含まれる Na + K 原子数は, 0.22-0.56 であり, hornblende-edenite-tschermakite-pargasite の 4 成分を端成分とした分類図(Leake, 1978)では, hornblende に近い組成を示すものの, 相対的に pargasite 成分に富む組成を示す(図 20b). Cu 含有量は 1.0-2.5 ppm である(表 8). Hawthorne et al. (2012)による分類では, magnesio-hornblende 及び magnesio-ferri-hornblende に分類される.

デイサイト質エンクレーブに含まれる角閃石はマイクロ花崗岩に含まれる角閃石の主要元素組成と類似した元素組成を示すが, 希土類元素組成では両者に組成差が認められ, マイクロ花崗岩に含まれる角閃石はデイサイト質エンクレーブの角閃石よりも中希土類(Sm)に富む組成を示す(図 21). Cu 含有量はマイクロ花崗岩及びデイサイト質エンクレーブ中の角閃石が概ね類似した含有量(0.7-1.8 ppm に集中)を示し, 玄武岩質エンクレーブ中の角閃石が相対的に高い含有量(1.0-2.2 ppm に集中)を示す傾向が認められるが, その差は極めて小さい(図 22). Boynton (1984)の C1 コンドライトで規格化したサンプルごとの平均希土類元素パターンについては, マイクロ花崗岩中の角閃石及びデイサイト質エンクレーブ中に含まれる角閃石は類似した希土類元素パターンを示し, Eu に負の異常が認められた(図 23). 一方, 玄武岩質エンクレーブ中の角閃石には Eu の負異常は認められなかった. 試料ごとの希土類元素の平均含有量はマイクロ花崗岩中の角閃石, デイサイト質エンクレーブ中の角閃石, 玄武岩質エンクレーブ中の角閃石の順に大きく, 全岩の SiO₂ 含有量に比例して増大している.

表2 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩に含まれる角閃石の元素組成
(代表値：EPMAによる)

wt. %	N1_Hb1	N1_Hb2	N1_Hb3	N1_Hb4	N1_Hb5	N1_Hb6	N1_Hb7	N1_Hb8	N1_Hb9	N1_Hb10
SiO ₂	49.26	48.89	48.61	49.17	49.70	49.19	49.43	49.32	48.97	49.42
TiO ₂	1.15	1.34	1.32	1.31	1.24	0.98	1.27	1.28	1.30	1.31
Al ₂ O ₃	4.84	5.22	5.19	4.84	4.84	4.23	5.05	4.98	5.00	5.19
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
FeO	13.10	13.22	13.50	13.86	14.06	14.06	13.31	13.97	13.25	13.22
MnO	0.62	0.60	0.57	0.67	0.68	0.70	0.61	0.61	0.55	0.63
MgO	14.33	14.36	13.95	14.01	14.47	14.11	14.39	13.72	14.38	14.31
CaO	10.76	10.84	10.75	10.55	10.48	10.07	10.73	10.38	10.82	10.73
Na ₂ O	1.75	1.82	1.84	1.85	1.77	1.88	1.79	1.93	1.74	1.71
K ₂ O	0.24	0.28	0.28	0.23	0.26	0.39	0.25	0.30	0.25	0.31
F	0.41	0.40	0.47	0.44	0.53	0.66	0.42	0.44	0.37	0.43
Cl	0.14	0.16	0.16	0.14	0.14	0.16	0.15	0.20	0.14	0.16
Total	96.61	97.13	96.65	97.07	98.20	96.42	97.40	97.12	96.77	97.42
Formula										
T site										
Si	7.264	7.184	7.199	7.239	7.223	7.305	7.231	7.264	7.213	7.229
Al	0.736	0.816	0.801	0.761	0.777	0.695	0.769	0.736	0.787	0.771
T subtotal	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
C site										
Ti	0.128	0.148	0.147	0.145	0.136	0.110	0.140	0.142	0.144	0.144
Al	0.106	0.089	0.105	0.079	0.051	0.045	0.102	0.129	0.082	0.123
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.273	0.285	0.260	0.313	0.407	0.387	0.298	0.279	0.292	0.288
Fe ²⁺	1.342	1.333	1.408	1.388	1.268	1.335	1.321	1.437	1.326	1.324
Mg	3.151	3.145	3.079	3.076	3.135	3.123	3.138	3.012	3.157	3.121
C subtotal	5.000	5.000	4.999	5.001	5.000	5.000	4.999	5.000	5.001	5.000
B site										
Mn ²⁺	0.077	0.075	0.071	0.083	0.084	0.088	0.076	0.075	0.068	0.077
Fe ²⁺	0.001	0.006	0.003	0.006	0.034	0.024	0.009	0.004	0.015	0.005
Ca	1.701	1.707	1.706	1.664	1.631	1.603	1.682	1.638	1.708	1.682
Na	0.221	0.211	0.220	0.247	0.251	0.286	0.232	0.282	0.209	0.236
B subtotal	2.000	1.999	2.000	2.000	2.000	2.001	1.999	1.999	2.000	2.000
A site										
Na	0.279	0.306	0.307	0.282	0.248	0.255	0.274	0.269	0.288	0.250
K	0.044	0.052	0.054	0.044	0.048	0.074	0.046	0.057	0.046	0.058
A subtotal	0.323	0.358	0.361	0.326	0.296	0.329	0.320	0.326	0.334	0.308
O (non-W)	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
W site										
OH	1.773	1.775	1.737	1.760	1.721	1.651	1.771	1.747	1.792	1.762
F	0.192	0.185	0.222	0.204	0.244	0.309	0.193	0.203	0.174	0.199
Cl	0.035	0.040	0.041	0.036	0.035	0.040	0.036	0.050	0.034	0.039
W subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Total T,C,B,A	15.323	15.357	15.360	15.327	15.296	15.330	15.318	15.325	15.335	15.308

表3 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩に含まれる角閃石の元素組成
(代表値：LA-ICP-MSによる)

wt. %	N1c_Hb1	N1c_Hb2	N1c_Hb3	N1c_Hb4	N1c_Hb5	N1c_Hb6	N1c_Hb7	N1c_Hb8	N1c_Hb9	N1c_Hb10
SiO ₂	49.4	51.0	47.8	48.6	48.0	48.0	52.2	48.3	45.0	45.1
TiO ₂	1.3	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	1.1	1.2	2.6	2.9
Al ₂ O ₃	6.7	5.4	5.6	5.3	5.3	5.5	5.1	5.2	8.8	8.9
FeO	13.2	13.2	14.4	14.0	14.5	14.2	13.0	14.4	13.7	13.5
MnO	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	0.8	0.9	0.4	0.4
MgO	16.9	16.8	18.3	18.2	18.3	18.5	16.4	18.0	17.1	16.9
CaO	8.8	9.1	9.6	9.7	9.7	9.5	9.4	9.9	9.9	9.9
Na ₂ O	1.9	2.3	1.9	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	2.2	2.1
K ₂ O	1.0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	12.0	10.0	6.4	8.7	19.1	18.8	11.8	9.3	7.8	21.2
Sc	309.7	287.6	364.9	354.5	379.0	459.7	300.8	272.4	220.7	222.5
V	110.6	96.1	119.1	117.3	123.7	135.2	114.6	98.2	235.7	261.9
Cr	7.2	0.4	0.4	0.0	0.0	2.4	0.0	2.0	2.3	6.4
Co	30.2	29.6	32.3	33.3	32.7	34.8	31.4	29.1	24.6	29.2
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	1.4	1.8	1.2	1.1	1.0	1.2	2.5	1.6	1.4	1.7
Zn	266.2	266.7	275.8	264.4	287.7	295.6	262.9	280.2	178.4	173.7
Ga	29.0	16.5	20.6	19.0	17.3	21.6	16.4	18.1	18.0	17.4
Rb	13.9	1.0	0.6	0.3	0.2	0.4	1.1	0.4	0.6	0.4
Sr	16.8	18.2	14.8	13.4	12.9	15.2	14.9	16.8	81.2	80.2
Y	550.1	287.2	333.6	328.6	372.7	392.1	303.8	287.0	174.2	158.7
Zr	1319.9	61.1	66.5	70.1	85.1	99.4	61.5	73.7	115.1	118.4
Nb	65.9	15.2	16.0	15.9	15.5	16.8	15.9	18.0	12.1	12.7
Sn	0.9	1.7	2.2	2.0	1.6	1.9	2.0	2.0	1.9	1.4
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	114.6	47.4	46.8	53.0	39.7	43.3	48.2	55.9	85.2	72.8
La	59.1	19.5	24.0	20.7	22.9	22.5	22.2	23.3	10.8	11.2
Ce	333.9	109.6	128.7	113.4	120.2	117.6	109.2	124.6	59.2	53.0
Pr	51.3	18.3	24.0	21.5	22.6	22.6	19.7	23.1	10.2	10.2
Nd	235.9	114.6	136.6	134.0	132.0	151.2	123.3	127.8	62.4	56.7
Sm	76.9	42.8	43.4	50.5	51.7	48.2	46.9	45.9	25.9	23.7
Eu	4.6	3.3	4.6	3.8	3.6	4.9	3.3	4.4	5.3	3.8
Gd	82.8	44.6	66.5	54.9	61.1	65.3	48.0	44.9	29.5	26.6
Tb	15.0	7.0	10.3	8.8	10.9	10.9	8.2	8.5	5.3	4.5
Dy	98.5	55.5	62.6	70.6	65.9	72.5	54.8	64.4	32.1	29.5
Ho	20.5	10.8	12.4	11.9	14.8	15.8	11.8	13.0	5.8	4.8
Er	57.8	31.7	33.5	37.8	34.9	36.7	31.7	35.5	15.1	20.9
Tm	5.6	3.1	4.0	3.2	4.7	5.1	2.5	3.6	2.1	1.6
Yb	53.4	19.7	20.2	23.9	28.5	34.2	24.6	20.3	13.5	11.5
Lu	5.3	2.9	2.9	3.4	4.0	4.1	3.2	2.5	1.8	1.8
Hf	31.1	0.0	2.2	1.5	1.4	4.6	1.4	1.8	1.4	5.8
Ta	4.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.9	0.1	4.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.8	0.8

表4 牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブに含まれる角閃石の元素組成
(代表値：EPMAによる)

wt. %.	N229c_1	N229c_2	N229c_3	N229c_4	N229c_5	N229c_6	N229c_7	N229c_8	N229c_9	N229c_10
SiO ₂	48.41	48.08	48.82	48.79	48.20	49.47	48.99	48.88	48.95	48.98
TiO ₂	1.33	1.44	1.33	1.37	1.37	1.28	1.27	1.29	1.35	1.24
Al ₂ O ₃	5.17	5.40	5.00	5.16	5.32	4.78	5.07	4.86	4.90	4.92
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
FeO	13.30	13.49	13.16	13.34	13.43	13.24	13.01	13.16	13.53	13.12
MnO	0.58	0.52	0.53	0.55	0.56	0.51	0.55	0.53	0.61	0.58
MgO	14.15	14.01	14.72	14.52	13.92	14.51	14.46	14.35	13.86	14.51
CaO	10.70	10.85	10.76	10.95	10.78	10.75	10.84	10.86	10.69	10.64
Na ₂ O	1.67	1.81	1.71	1.82	1.76	1.67	1.76	1.71	1.96	1.69
K ₂ O	0.28	0.30	0.27	0.25	0.30	0.24	0.28	0.24	0.29	0.27
F	0.32	0.37	0.34	0.38	0.36	0.36	0.39	0.43	0.61	0.33
Cl	0.16	0.18	0.15	0.16	0.17	0.15	0.15	0.15	0.18	0.15
Total	96.08	96.44	96.78	97.28	96.16	96.95	96.78	96.46	96.92	96.41
Formula										
T site										
Si	7.183	7.135	7.178	7.161	7.167	7.258	7.214	7.229	7.247	7.224
Al	0.817	0.865	0.822	0.839	0.833	0.742	0.786	0.771	0.753	0.776
T subtotal	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
C site										
Ti	0.149	0.161	0.147	0.151	0.153	0.142	0.140	0.143	0.151	0.137
Al	0.087	0.079	0.044	0.054	0.099	0.084	0.093	0.077	0.101	0.078
Cr	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
Fe ³⁺	0.314	0.278	0.353	0.302	0.274	0.303	0.276	0.272	0.219	0.335
Fe ²⁺	1.318	1.382	1.230	1.317	1.388	1.298	1.315	1.345	1.457	1.260
Mg	3.131	3.100	3.226	3.176	3.086	3.174	3.175	3.163	3.058	3.190
C subtotal	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.001	4.999	5.000	5.001	5.000
B site										
Mn ²⁺	0.073	0.065	0.066	0.068	0.070	0.063	0.069	0.066	0.062	0.072
Fe ²⁺	0.017	0.014	0.035	0.018	0.008	0.024	0.010	0.011	0.000	0.024
Ca	1.702	1.725	1.695	1.722	1.717	1.690	1.711	1.721	1.695	1.682
Na	0.208	0.196	0.204	0.192	0.205	0.223	0.210	0.201	0.243	0.222
B subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.999	2.000	2.000
A site										
Na	0.273	0.326	0.285	0.327	0.302	0.250	0.293	0.291	0.319	0.261
K	0.053	0.056	0.051	0.046	0.057	0.045	0.053	0.046	0.056	0.050
A subtotal	0.326	0.382	0.336	0.373	0.359	0.295	0.346	0.337	0.375	0.311
O (non-W)	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
W site										
OH	1.812	1.782	1.805	1.784	1.790	1.795	1.782	1.763	1.670	1.809
F	0.149	0.173	0.156	0.178	0.168	0.167	0.180	0.199	0.286	0.154
Cl	0.039	0.045	0.038	0.039	0.043	0.038	0.038	0.038	0.044	0.037
W subtotal	2.000	2.000	1.999	2.001	2.001	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Total T,C,B,A	15.326	15.382	15.336	15.373	15.359	15.296	15.345	15.336	15.376	15.311

表5 牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブに含まれる角閃石の元素組成
(代表値：LA-ICP-MSによる)

wt. %	N229c_Hb1	N229c_Hb2	N229c_Hb3	N229c_Hb4	N229c_Hb5	N229c_Hb6	N229c_Hb7	N229c_Hb8	N229c_Hb9	N229c_Hb10
SiO ₂	46.9	46.5	46.8	47.5	47.3	46.4	47.0	47.5	46.0	47.3
TiO ₂	1.4	1.3	1.3	1.1	1.1	1.3	1.2	1.2	1.4	1.2
Al ₂ O ₃	5.2	5.2	5.5	4.5	4.5	5.5	5.3	4.9	6.2	5.1
FeO	14.1	14.0	14.3	14.5	14.3	13.9	13.4	13.2	13.5	13.3
MnO	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
MgO	16.9	17.4	16.6	16.9	17.1	16.7	17.2	17.5	16.9	17.3
CaO	13.1	13.2	13.2	13.2	13.4	13.7	13.4	13.4	13.4	13.4
Na ₂ O	1.7	1.6	1.7	1.5	1.5	1.8	1.7	1.7	1.9	1.6
K ₂ O	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	10.1	14.0	15.9	16.1	18.1	9.7	16.5	19.8	17.3	17.4
Sc	234.0	263.3	231.8	192.3	190.4	190.5	214.6	205.2	281.4	201.7
V	197.9	192.1	201.7	175.6	173.9	188.8	185.5	178.6	220.4	179.9
Cr	0.0	6.2	11.7	1.4	9.0	0.0	2.4	8.8	0.5	0.0
Co	41.0	44.4	41.5	37.8	42.7	40.1	42.7	45.7	43.6	44.0
Ni	0.0	1.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	0.9	1.1	0.9	0.9	0.8	1.2	0.7	0.7	0.8	0.9
Zn	230.7	215.4	216.3	226.3	224.8	224.9	223.5	215.6	214.2	213.5
Ga	16.7	15.1	15.3	13.9	14.2	13.3	11.4	13.9	15.4	12.6
Rb	0.0	0.3	0.2	0.0	0.1	0.4	0.2	0.5	0.4	0.0
Sr	17.8	16.0	16.7	13.1	13.3	16.5	17.1	14.8	24.7	16.1
Y	231.4	258.2	266.9	254.0	257.7	212.1	235.7	226.2	259.0	215.6
Zr	100.6	98.1	97.5	96.1	82.7	63.3	83.5	74.5	80.8	79.6
Nb	16.6	11.6	15.4	9.4	8.8	14.3	9.6	9.9	15.5	10.6
Sn	0.3	1.1	0.3	0.7	0.9	1.0	1.4	2.2	2.9	1.6
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	60.4	39.1	42.0	29.1	23.5	51.3	29.6	34.0	76.3	32.0
La	21.1	16.6	18.7	16.4	15.9	16.6	16.6	14.1	20.1	16.2
Ce	96.1	84.4	92.5	79.6	83.2	83.5	85.0	76.9	95.4	79.2
Pr	15.9	14.1	17.7	12.8	16.3	16.7	16.1	14.5	19.0	16.7
Nd	93.4	86.9	96.5	86.9	84.5	92.8	90.3	80.4	109.4	94.0
Sm	35.4	25.8	34.3	26.5	29.0	27.8	34.0	36.6	40.1	31.8
Eu	3.9	5.3	5.9	3.6	4.4	2.8	2.9	4.6	5.6	4.2
Gd	35.7	45.7	39.9	41.6	33.4	31.1	40.1	35.1	41.8	29.3
Tb	7.4	6.3	6.6	7.0	6.0	6.8	7.8	6.6	7.9	6.6
Dy	48.0	50.5	51.1	45.1	46.3	39.3	46.1	39.8	51.3	45.3
Ho	9.9	10.2	9.9	9.6	9.1	8.4	9.6	9.8	9.6	8.2
Er	28.8	25.8	27.3	27.4	28.2	22.5	22.8	23.8	32.7	24.2
Tm	2.9	2.8	3.4	3.4	4.2	2.5	3.9	3.1	3.6	3.5
Yb	23.2	21.6	24.6	18.5	21.9	16.7	24.1	16.3	19.3	19.9
Lu	2.1	2.2	2.3	2.5	2.5	2.3	2.0	2.6	2.6	1.2
Hf	3.1	1.6	4.1	1.3	1.0	0.0	1.1	1.9	1.2	2.7
Ta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1

表 6 牛沢又北岩体に産する安山岩質エンクレーブ中に含まれる角閃石の元素組成
(代表値：EPMA による)

wt. %.	N227_1	N227_2	N227_3	N227_4	N227_5	N227_6	N227_7	N227_8	N227_9	N227_10
SiO ₂	47.84	48.34	50.35	48.67	48.85	49.05	49.99	48.29	48.21	48.51
TiO ₂	1.36	1.37	0.98	1.42	1.30	1.26	1.13	1.47	1.55	1.36
Al ₂ O ₃	5.54	5.30	3.97	5.48	4.92	4.95	4.92	5.28	5.30	5.08
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.35	0.33	0.42	0.31	0.30	0.36	0.32	0.35	0.35	0.33
MnO	13.88	13.82	13.52	13.13	12.83	13.21	12.91	13.59	13.77	13.13
MgO	14.05	14.19	14.86	14.20	14.67	14.49	14.76	14.02	13.82	14.55
CaO	10.92	10.91	10.49	11.00	10.74	10.73	10.85	11.01	10.91	10.70
Na ₂ O	1.98	1.86	1.44	2.09	1.74	1.54	1.58	1.82	1.87	1.90
K ₂ O	0.32	0.33	0.30	0.33	0.28	0.28	0.26	0.35	0.37	0.27
F	0.75	0.85	0.83	0.95	0.75	0.54	0.63	0.67	0.85	0.64
Cl	0.21	0.19	0.17	0.19	0.16	0.16	0.14	0.18	0.17	0.16
Total	97.20	97.48	97.34	97.78	96.57	96.56	97.48	97.01	97.16	96.63
Formula										
T site										
Si	7.107	7.152	7.368	7.175	7.221	7.234	7.289	7.155	7.154	7.175
Al	0.893	0.848	0.632	0.825	0.779	0.766	0.711	0.845	0.846	0.825
T subtotal	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
C site										
Ti	0.152	0.153	0.108	0.157	0.144	0.140	0.123	0.164	0.173	0.151
Al	0.077	0.076	0.053	0.128	0.078	0.094	0.134	0.076	0.081	0.061
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.189	0.192	0.386	0.115	0.290	0.323	0.284	0.226	0.218	0.302
Fe ²⁺	1.471	1.448	1.211	1.478	1.251	1.258	1.249	1.437	1.473	1.277
Mg	3.111	3.131	3.242	3.122	3.232	3.185	3.209	3.096	3.056	3.209
C subtotal	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	4.999	4.999	5.001	5.000
B site										
Mn ²⁺	0.044	0.041	0.052	0.039	0.037	0.045	0.040	0.043	0.044	0.041
Fe ²⁺	0.064	0.069	0.058	0.026	0.046	0.047	0.042	0.021	0.018	0.045
Ca	1.738	1.729	1.645	1.738	1.700	1.696	1.695	1.748	1.735	1.695
Na	0.154	0.161	0.244	0.197	0.217	0.212	0.224	0.187	0.203	0.218
B subtotal	2.000	2.000	1.999	2.000	2.000	2.000	2.001	1.999	2.000	1.999
A site										
Na	0.416	0.374	0.165	0.401	0.282	0.228	0.222	0.335	0.335	0.326
K	0.061	0.062	0.056	0.062	0.053	0.052	0.048	0.066	0.069	0.051
A subtotal	0.477	0.436	0.221	0.463	0.335	0.280	0.270	0.401	0.404	0.377
O (non-W)	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
W site										
OH	1.593	1.556	1.574	1.510	1.610	1.710	1.675	1.642	1.559	1.662
F	0.354	0.397	0.383	0.444	0.351	0.251	0.290	0.313	0.398	0.298
Cl	0.053	0.047	0.043	0.046	0.039	0.039	0.035	0.045	0.042	0.040
W subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	1.999	2.000
Total T,C,B,A	15.477	15.436	15.220	15.463	15.335	15.280	15.270	15.399	15.405	15.376

表7 牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる角閃石の元素組成
(代表値：EPMAによる)

wt. %.	EMME_1	EMME_2	EMME_3	EMME_4	EMME_5	EMME_6	EMME_7	EMME_8	EMME_9	EMME_10
SiO ₂	46.30	44.40	44.95	45.11	45.17	45.24	46.29	46.02	44.58	44.74
TiO ₂	1.68	2.52	2.31	2.07	2.09	2.09	2.09	2.19	2.30	2.27
Al ₂ O ₃	7.58	9.33	9.08	8.79	8.45	8.49	7.95	8.15	8.94	8.82
Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.01
FeO	13.24	13.34	13.55	12.94	13.50	13.13	12.82	12.50	13.64	13.19
MnO	0.32	0.32	0.29	0.25	0.30	0.29	0.30	0.31	0.27	0.29
MgO	13.62	13.12	13.31	13.23	13.19	13.51	13.82	14.07	13.05	13.35
CaO	11.11	11.18	11.26	11.41	10.99	11.10	11.11	10.85	11.25	11.10
Na ₂ O	1.62	2.06	2.00	1.86	1.97	1.87	1.77	1.80	1.94	1.95
K ₂ O	0.16	0.22	0.24	0.24	0.20	0.21	0.20	0.19	0.26	0.23
F	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Cl	0.07	0.07	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Total	95.73	96.56	97.07	96.00	95.93	95.99	96.43	96.21	96.30	96.02
Formula										
T site										
Si	6.876	6.595	6.640	6.722	6.741	6.733	6.820	6.775	6.647	6.669
Al	1.124	1.405	1.360	1.278	1.259	1.267	1.180	1.225	1.353	1.331
T subtotal	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000
C site										
Ti	0.187	0.282	0.257	0.232	0.234	0.234	0.232	0.242	0.258	0.254
Al	0.203	0.228	0.221	0.266	0.226	0.222	0.200	0.189	0.218	0.218
Cr	0.004	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.001
Fe ³⁺	0.325	0.197	0.207	0.149	0.206	0.215	0.296	0.362	0.193	0.209
Fe ²⁺	1.267	1.388	1.384	1.410	1.399	1.333	1.237	1.112	1.431	1.352
Mg	3.015	2.905	2.931	2.939	2.935	2.997	3.036	3.089	2.900	2.966
C subtotal	5.001	5.000	5.000	5.000	5.000	5.001	5.001	4.999	5.000	5.000
B site										
Mn ²⁺	0.040	0.040	0.037	0.031	0.038	0.037	0.037	0.038	0.034	0.036
Fe ²⁺	0.053	0.073	0.082	0.054	0.080	0.086	0.048	0.066	0.077	0.084
Ca	1.768	1.779	1.782	1.822	1.758	1.770	1.754	1.712	1.797	1.773
Na	0.139	0.109	0.100	0.094	0.124	0.107	0.161	0.184	0.092	0.107
B subtotal	2.000	2.001	2.001	2.001	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
A site										
Na	0.328	0.484	0.474	0.444	0.445	0.431	0.344	0.331	0.468	0.458
K	0.029	0.041	0.044	0.045	0.039	0.040	0.037	0.036	0.050	0.044
A subtotal	0.357	0.525	0.518	0.489	0.484	0.471	0.381	0.367	0.518	0.502
O (non-W)	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000	22.000
W site										
OH	1.981	1.981	1.972	1.978	1.981	1.981	1.975	1.980	1.981	1.981
F	0.000	0.001	0.012	0.004	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000
Cl	0.019	0.017	0.016	0.018	0.019	0.019	0.020	0.019	0.019	0.019
W subtotal	2.000	1.999	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Total T,C,B,A	15.358	15.526	15.519	15.490	15.484	15.472	15.382	15.366	15.518	15.502

表 8 牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる角閃石の元素組成
(代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %	EMME_Hb1	EMME_Hb2	EMME_Hb3	EMME_Hb4	EMME_Hb5	EMME_Hb6	EMME_Hb7	EMME_Hb8	EMME_Hb9	EMME_Hb10
SiO ₂	44.3	44.8	44.2	42.2	42.0	42.2	42.7	42.6	42.5	41.8
TiO ₂	1.7	1.9	1.8	2.1	2.2	2.0	2.0	1.8	1.7	2.0
Al ₂ O ₃	8.4	8.6	8.5	8.7	8.9	9.0	8.3	8.2	8.0	9.1
FeO	13.0	13.0	13.4	13.3	13.2	13.1	13.3	13.7	13.3	13.6
MnO	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
MgO	17.2	16.4	16.6	17.5	17.6	17.8	17.6	17.5	18.3	17.2
CaO	13.3	13.3	13.5	13.8	13.8	13.5	13.8	13.9	14.1	14.0
Na ₂ O	1.5	1.6	1.6	1.9	1.9	2.0	1.9	1.8	1.7	1.9
K ₂ O	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Total	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	478.0	4.6	4.9	4.9	4.7	5.3	5.4	28.5	4.3	4.2
Sc	61.1	77.5	70.5	69.9	72.6	68.1	67.0	60.6	58.3	85.5
V	429.3	429.2	448.2	434.3	426.9	410.6	405.8	433.5	405.0	424.3
Cr	59.9	56.2	58.4	28.0	27.8	31.5	44.2	52.0	46.6	712.7
Co	58.2	57.4	55.1	58.5	54.4	53.6	56.7	59.1	54.1	51.7
Ni	29.4	26.6	24.3	14.8	17.7	17.4	33.2	27.6	27.4	26.3
Cu	1.2	1.1	1.7	1.1	1.5	1.7	1.3	1.4	1.6	1.1
Zn	81.2	75.9	81.9	70.1	70.5	68.3	76.6	71.1	67.3	71.0
Ga	12.6	11.8	12.8	11.6	14.8	12.1	15.5	14.4	11.6	12.4
Rb	0.0	0.1	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0
Sr	63.1	65.2	64.5	70.6	72.3	67.7	62.5	58.9	57.5	67.7
Y	13.1	20.2	19.9	44.1	44.7	59.9	36.0	22.8	17.9	26.4
Zr	71.5	75.3	81.0	85.1	101.2	90.7	86.7	78.8	64.9	91.9
Nb	2.3	3.0	2.7	4.2	3.5	3.6	4.4	2.4	2.2	4.2
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.2	0.0	0.9	0.3
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	32.5	32.7	28.3	34.3	35.3	28.4	25.3	18.3	24.6	35.7
La	4.8	5.8	5.9	5.5	6.3	6.2	6.1	5.4	3.9	6.3
Ce	17.0	22.5	25.1	32.5	31.5	27.7	28.4	19.9	16.2	27.6
Pr	2.2	2.5	3.7	4.5	5.4	4.5	4.1	2.6	2.1	3.9
Nd	6.9	12.3	8.9	22.9	25.7	26.0	23.2	7.2	5.5	15.4
Sm	0.0	0.0	0.0	3.3	4.1	3.4	1.9	0.8	0.0	2.4
Eu	0.0	0.7	0.4	0.9	0.4	1.6	1.8	0.2	0.5	0.6
Gd	0.0	1.2	0.9	2.1	7.0	4.0	3.7	0.0	0.0	2.5
Tb	0.0	0.0	0.2	0.6	0.7	0.6	0.3	0.1	0.0	0.1
Dy	0.7	0.7	1.4	6.4	5.1	6.8	2.3	0.5	1.7	4.6
Ho	0.0	0.2	0.1	1.8	1.5	1.8	0.8	0.3	0.0	0.6
Er	0.0	0.6	0.6	2.2	4.9	5.3	1.8	1.4	0.7	0.8
Tm	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	0.0	0.0	0.0	3.6	2.8	3.4	0.4	0.5	0.0	0.8
Lu	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Hf	0.0	0.0	0.4	0.0	1.1	0.6	0.9	0.0	0.0	0.0
Ta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2

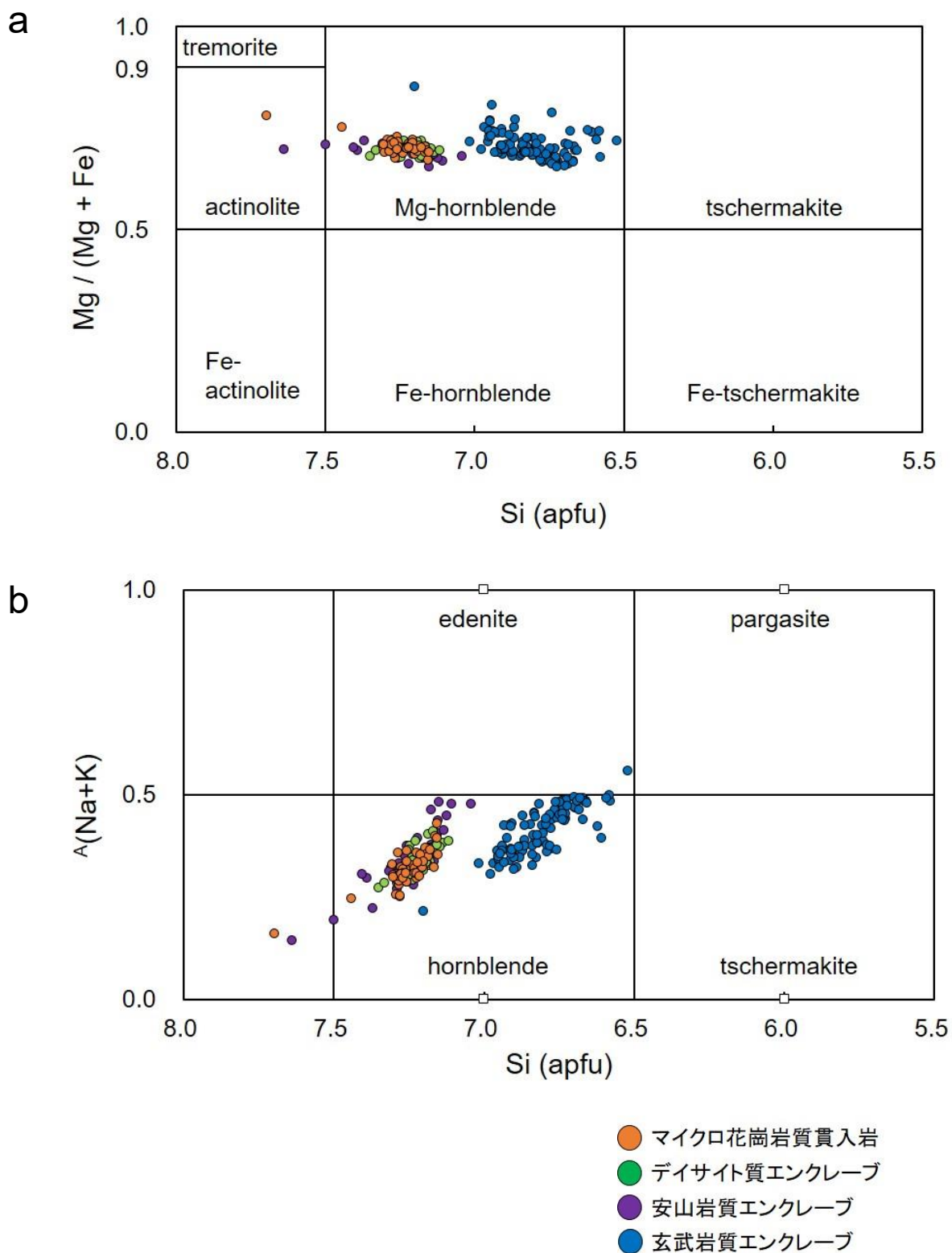


図 20 荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石の化学組成

a. Si (apfu)及び Mg#による分類(Leake et al., 1997). b. Si (apfu)及び A サイト中のアルカリ原子数による分類(Leake, 1978).

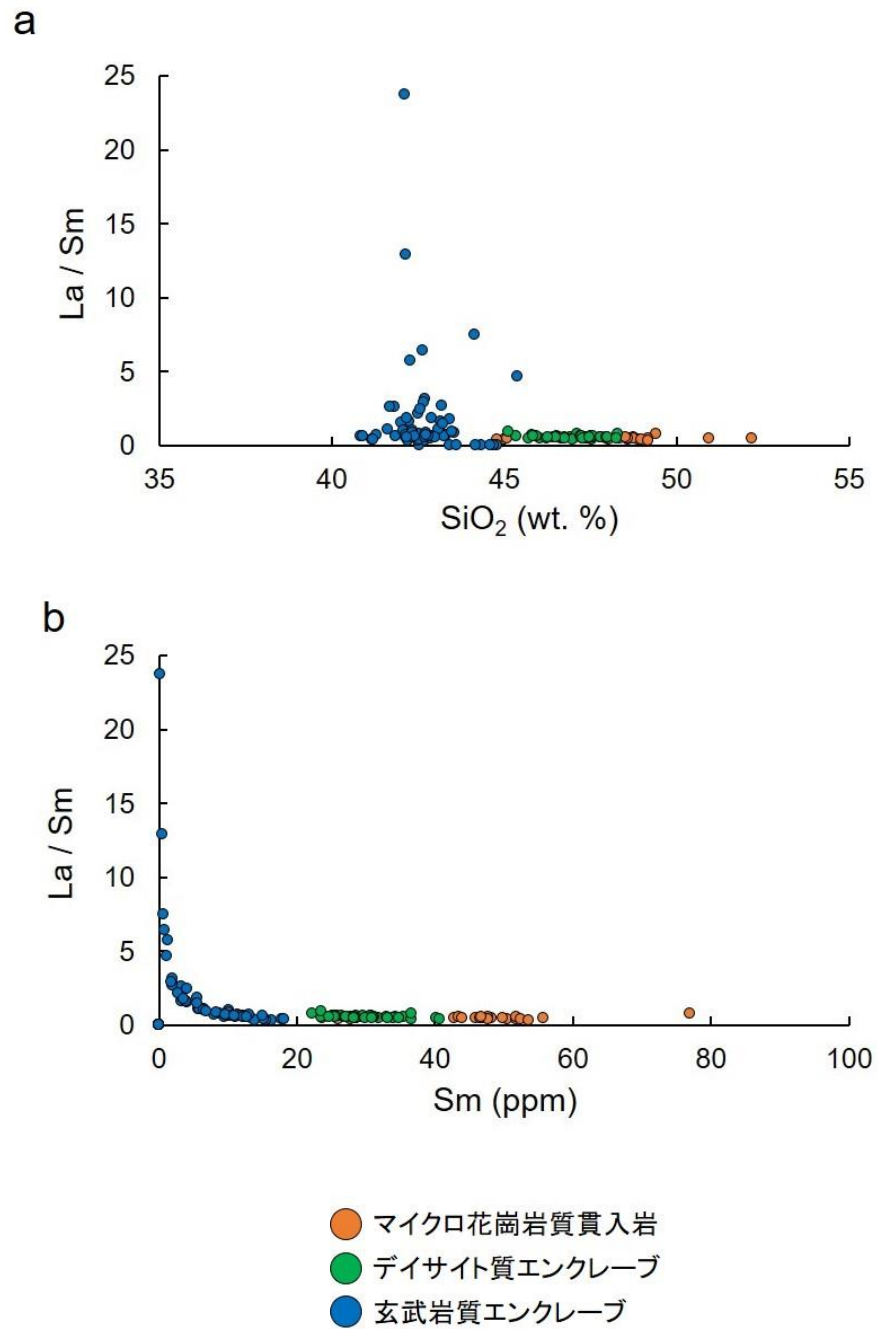


図 21 荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石の希土類元素組成

a. SiO_2 vs. 軽希土(La)中希土(Sm)比. b. 軽希土(La)中希土(Sm)比

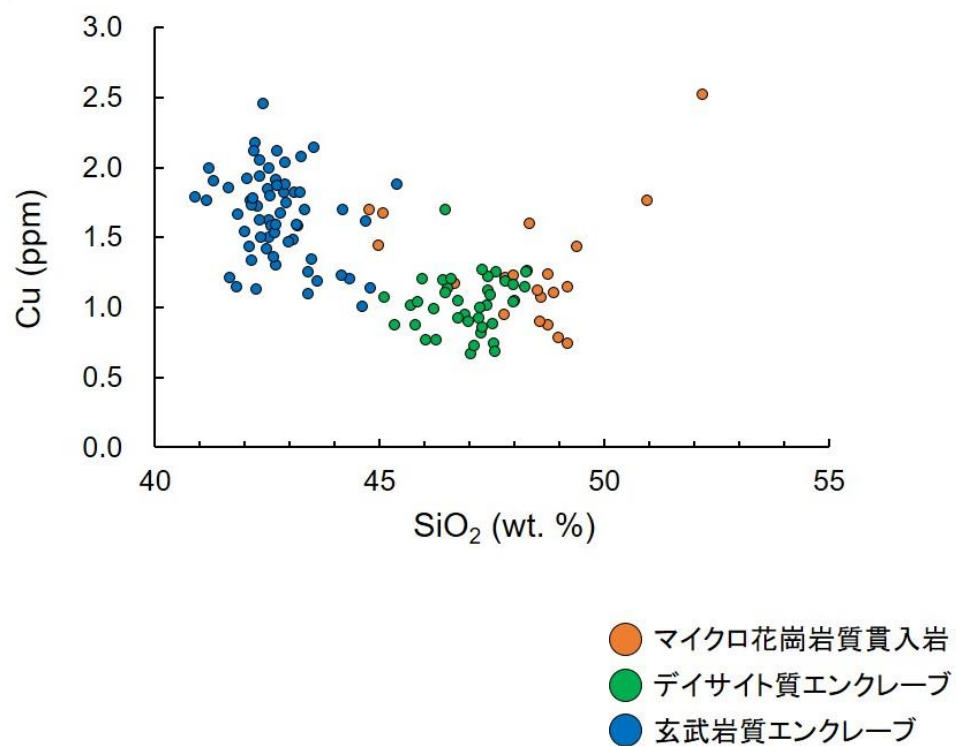


図 22 荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石の Cu 含有量

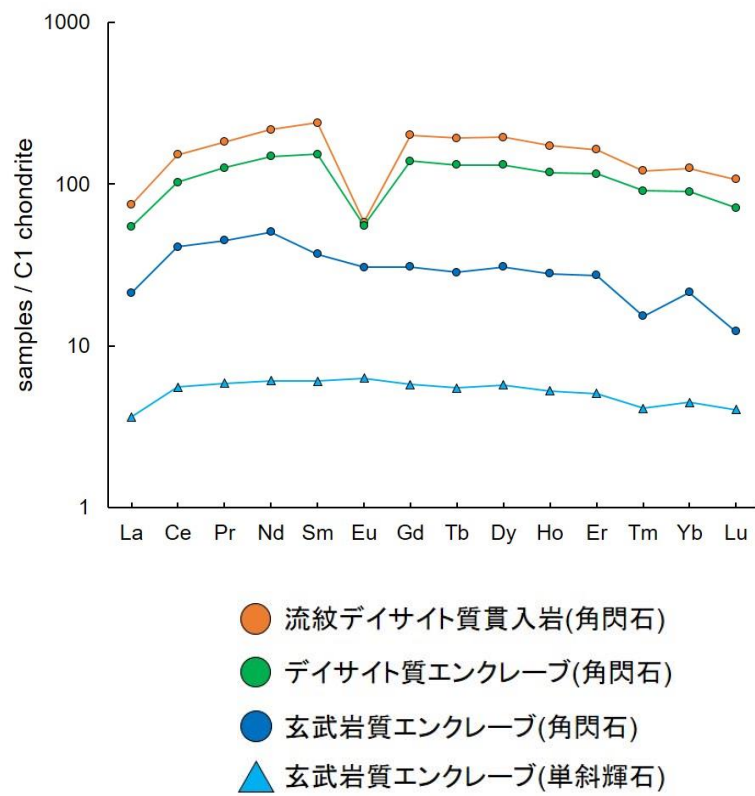


図 23 荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石と単斜輝石のコンドライト規格化平均希土類元素パターン

7.2. 単斜輝石

牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる単斜輝石を対象に EPMA 及び LA-ICP-MS による分析を行った。

EPMA による分析の結果、Wo 成分 40.6-47.2%，En 成分 39.0-49.4%，Fs 成分 8.8-16.4%の組成範囲を示し、diopside 及び Mg, Ca に富んだ augite に分類された(表 9；図 24)。また、Mg#は 0.71-0.84, Cr#は 0.00-0.16 である。

LA-ICP-MS による分析の結果は Mg#の増加と共に、Na₂O 含有量が減少する傾向を示す(表 10；図 25a)。Cu 含有量は 0.2-3.0 ppm であり、Mg#の減少とともに、Cu 含有量が増加する傾向を示す(図 25b)。また、Na₂O 含有量と Cu 含有量には概ね正の相関が認められる(図 25c)。コンドライトで規格化した単斜輝石の平均希土類元素パターンは、平滑なパターンを示す(図 23)。

表9 牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる単斜輝石の元素組成
(代表値：EPMA による)

wt. %.	EMME_Px1	EMME_Px2	EMME_Px3	EMME_Px4	EMME_Px5	EMME_Px6	EMME_Px7	EMME_Px8	EMME_Px9	EMME_Px10
SiO ₂	49.29	49.16	49.03	49.16	50.06	50.26	49.72	50.59	50.04	50.55
TiO ₂	0.92	0.88	1.03	0.93	0.55	0.58	0.63	0.58	0.63	0.54
Al ₂ O ₃	5.39	5.32	5.36	5.06	4.39	4.22	4.36	4.09	4.48	4.35
Cr ₂ O ₃	0.21	0.22	0.35	0.19	0.74	0.57	0.54	0.41	0.64	0.41
FeO	7.54	7.24	7.44	7.47	6.19	6.15	6.43	6.28	6.19	6.40
MnO	0.17	0.17	0.18	0.18	0.14	0.12	0.17	0.17	0.17	0.16
MgO	14.37	14.08	13.69	13.99	14.64	14.92	14.72	15.06	14.76	14.79
CaO	21.16	21.33	21.34	21.36	21.84	21.71	21.64	21.28	21.39	21.86
Na ₂ O	0.25	0.19	0.25	0.28	0.23	0.24	0.25	0.23	0.23	0.23
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Total	99.30	98.58	98.65	98.63	98.76	98.78	98.48	98.69	98.52	99.28
Formula										
T site										
Si	1.842	1.849	1.846	1.852	1.874	1.879	1.869	1.890	1.875	1.881
Al	0.158	0.151	0.154	0.148	0.126	0.121	0.131	0.110	0.125	0.119
T subtotal	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
M site										
Al	0.080	0.085	0.084	0.076	0.067	0.065	0.062	0.069	0.072	0.071
Fe ³⁺	0.059	0.036	0.030	0.052	0.034	0.037	0.054	0.020	0.022	0.033
Cr	0.006	0.006	0.010	0.006	0.022	0.017	0.016	0.012	0.019	0.012
Ti	0.026	0.025	0.029	0.026	0.015	0.016	0.018	0.016	0.018	0.015
Fe ²⁺	0.176	0.191	0.203	0.182	0.159	0.154	0.147	0.176	0.171	0.165
Mn	0.005	0.006	0.006	0.006	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005
Mg	0.801	0.789	0.768	0.786	0.817	0.831	0.825	0.839	0.824	0.821
Ca	0.847	0.859	0.861	0.862	0.876	0.869	0.871	0.851	0.858	0.872
Na	0.018	0.014	0.018	0.020	0.017	0.017	0.018	0.017	0.016	0.017
K	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
M subtotal	4.019	4.011	4.010	4.016	4.011	4.012	4.017	4.006	4.007	4.011
Mg#	0.77	0.78	0.77	0.77	0.81	0.81	0.80	0.81	0.81	0.80
Cr#	0.02	0.03	0.04	0.03	0.10	0.08	0.08	0.06	0.09	0.06
Wo	44.9	45.7	46.1	45.7	46.3	45.8	45.8	45.0	45.6	46.0
En	42.4	42.0	41.1	41.6	43.2	43.8	43.3	44.3	43.8	43.3
Fs	12.7	12.4	12.8	12.7	10.4	10.3	10.9	10.6	10.6	10.7

表 10 牛沢又北岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる単斜輝石の元素組成
(代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %	EMME_Px1	EMME_Px2	EMME_Px3	EMME_Px4	EMME_Px5	EMME_Px6	EMME_Px7	EMME_Px8	EMME_Px9	EMME_Px10
SiO ₂	50.0	50.8	50.2	54.1	53.1	52.8	51.6	51.9	52.7	53.7
TiO ₂	0.6	0.6	0.5	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2
Al ₂ O ₃	4.3	4.5	4.7	1.2	1.2	1.0	1.3	1.4	1.1	1.0
Cr ₂ O ₃	0.4	0.5	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FeO	7.8	7.5	6.9	9.5	9.8	9.9	9.9	10.0	9.2	9.8
MnO	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5
MgO	16.4	16.7	17.1	14.9	15.5	15.6	15.6	15.9	15.3	14.8
CaO	20.4	19.4	19.9	18.9	19.2	19.5	20.4	19.8	20.6	19.5
Na ₂ O	0.4	0.5	0.4	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
K ₂ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	100.4	100.5	100.4	100.0	100.1	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	6.7	6.1	10.0	8.7	10.1	3.9	4.7	9.1	8.2	3.6
Sc	141.0	135.8	132.0	105.2	63.1	91.2	101.3	72.5	90.2	91.7
V	415.2	402.3	401.7	227.9	161.7	194.0	221.8	189.7	174.8	193.5
Cr	2567.2	3354.6	2906.5	236.2	413.5	24.0	38.4	177.9	265.5	236.7
Co	43.2	38.6	39.6	41.8	38.6	40.1	39.0	41.1	38.4	42.2
Ni	64.9	64.2	94.4	24.2	18.3	19.3	17.2	29.1	20.9	30.0
Cu	0.6	0.7	0.7	0.6	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	1.0
Zn	36.3	35.5	31.4	101.7	92.9	97.0	81.6	98.3	88.7	98.8
Ga	7.1	6.8	7.4	4.1	4.4	4.0	4.9	4.5	3.8	3.9
Rb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sr	17.7	16.8	21.9	23.5	20.9	23.5	21.8	21.0	21.0	22.0
Y	10.7	10.1	12.4	7.5	6.5	5.9	7.7	6.1	4.7	13.9
Zr	13.3	12.2	14.0	22.9	16.3	19.6	23.4	21.3	15.0	20.1
Nb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sn	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.3
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	0.4	0.4	0.7	2.2	1.2	1.7	1.6	1.4	1.3	2.2
La	2.5	2.2	3.8	8.0	4.5	7.0	5.3	4.3	3.6	10.1
Ce	0.5	0.5	0.7	1.1	0.7	0.9	0.8	0.6	0.4	1.5
Pr	3.1	2.8	3.9	4.2	3.2	3.5	2.9	2.7	1.6	7.7
Nd	1.2	1.4	1.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.6	1.6
Sm	0.6	0.5	0.6	0.4	0.2	0.3	0.3	0.5	0.2	0.6
Eu	1.2	1.7	2.0	0.9	1.1	0.6	1.4	1.2	0.5	1.1
Gd	0.3	0.2	0.5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3
Tb	1.9	1.6	2.5	1.9	1.1	1.2	0.9	1.5	0.8	2.0
Dy	0.3	0.4	0.6	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.5
Ho	1.3	1.3	1.5	0.8	0.4	0.6	0.6	0.6	0.3	1.4
Er	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2
Tm	0.8	0.9	1.3	0.7	0.4	0.5	0.7	0.3	0.3	1.4
Yb	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
Lu	0.3	0.3	0.5	0.3	0.0	0.2	0.6	0.7	0.1	0.7
Hf	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ta	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

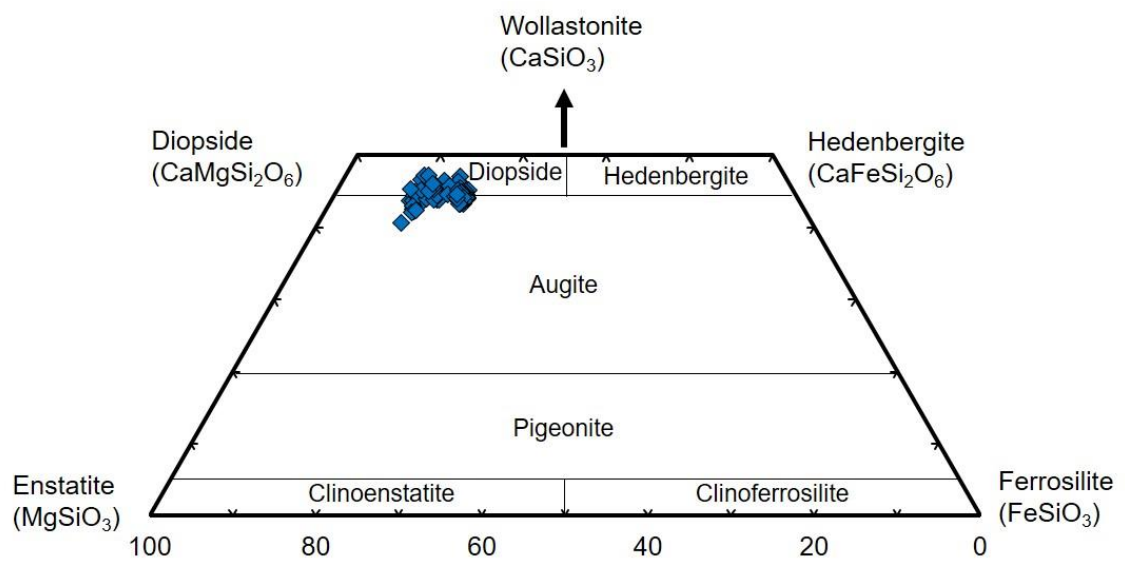


図 24 牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブに含まれる単斜輝石の主要元素組成

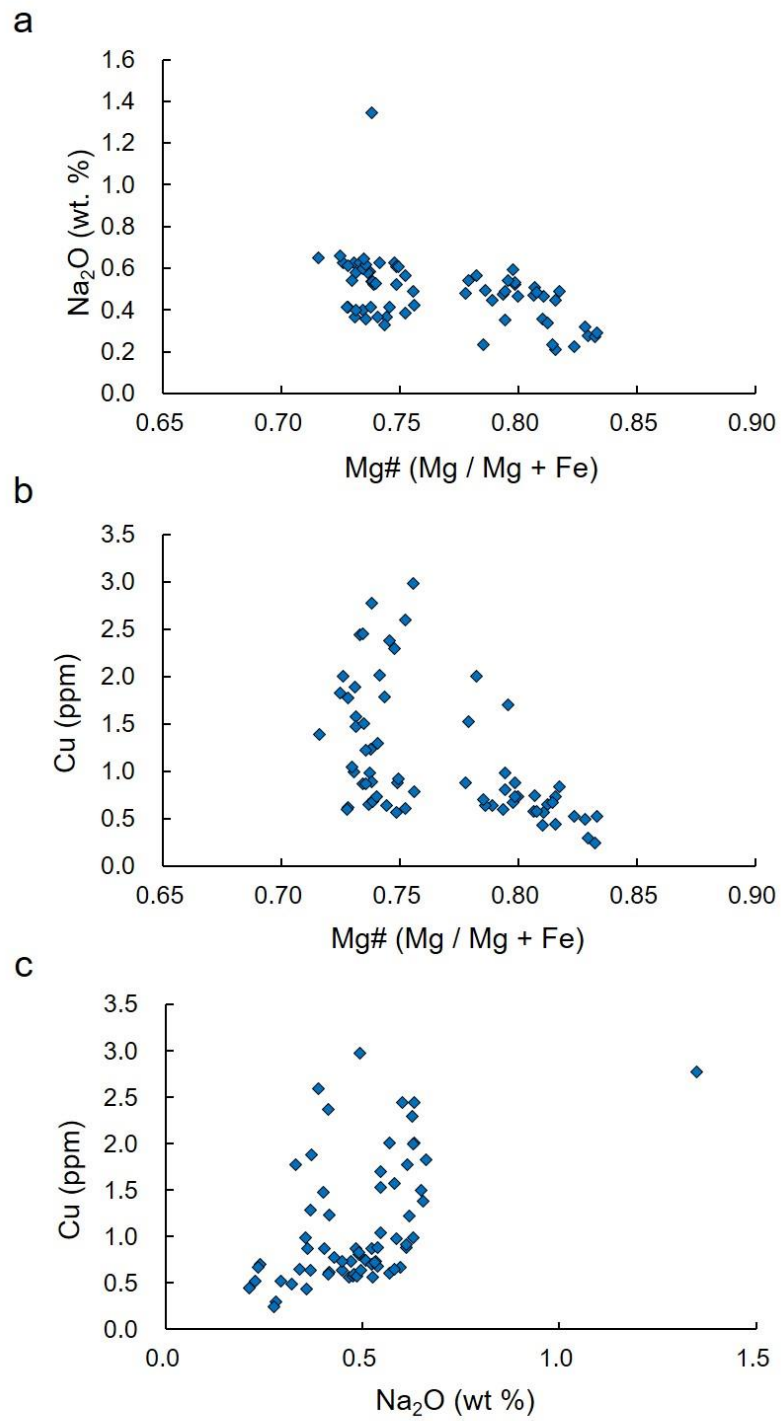


図 25 牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブに含まれる単斜輝石の元素組成

7.3. 斜長石

牛沢又北岩体のマイクロ花崗岩に含まれる短柱状斜長石、デイサイト質エンクレーブに含まれる短柱状斜長石及び長柱状斜長石、安山岩質エンクレーブに含まれる長柱状斜長石、牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる長柱状斜長石を対象に LA-ICP-MS による分析を行った。

マイクロ花崗岩中の短柱状の斜長石は An 11-38% であり、デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石は An 13-57%、短柱状斜長石は An 4-41% を示す(表 11, 12, 13)。また、安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石は An 12-55%、玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石は An 36-89% を示す(表 14 & 15)。

斜長石中に比較的多量に含まれる準主要元素である FeO, Sr, Ba の含有量を図 26 に示す。FeO は 0.1-2.0 wt. % の値を示し、An 値の増加に比例して増加する傾向を示す。Sr は玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石を除き、An 値の増加に比例して増加する傾向を示す。玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石では、An 値 55-90% の範囲において An 値の増加と共に減少する傾向を示す。Ba はデイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石を除き、An 値の減少と共に増加する傾向を示す。デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石は、玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石と同様に、著しく低い含有量を示す。この斜長石中の低い Ba 含有量は、An 値の範囲と形状が類似する安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石や、同一試料中に含まれ、An 値が重複する短柱状斜長石と明瞭な差を示す。

斜長石中の La 及び Ce の組成を図 27 に示す。La は An 値の減少と共にゆるやかに増加する傾向を示す。Ce はデイサイト質エンクレーブ中の斜長石を除き、La と同様

の傾向を示す。デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石は、玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石と同様に、著しく低い Ce 含有量を示す。この斜長石中の低い Ce 含有量は An 値の範囲と形状が類似する安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石や、同一試料中に含まれ、An 値が重複する短柱状斜長石と明瞭な差を示す。

斜長石中の半揮発元素として、Cs 及び Li の含有量を図 28 に示す。Cs は主に二つの組成トレンドに明瞭に区分され、玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石及びデイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石は、An 値の減少と共に Cs 含有量が増加する傾向を示し、連続した組成トレンドを示す。一方、マイクロ花崗岩質貫入岩、デイサイト質エンクレーブ中の短柱状斜長石、安山岩質エンクレーブの長柱状斜長石の Cs 含有量は著しく低い値を示す。Li は玄武岩質エンクレーブ中の斜長石で最も大きい含有量の最大値を示すものの、含有量の幅が著しい。一方で、マイクロ花崗岩中の短柱状斜長石、デイサイト質エンクレーブ中の長柱状及び短柱状斜長石は、低い含有量を示す。これらの斜長石と同様に安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石は概ね低い Li 含有量を示すが、0-5 ppm の幅を示す。

斜長石中の鉱床濃集元素として、Cu, Pb, Zn の含有量を図 29 に示す。Cu は Cs と同様な 2 つの組成トレンドに明瞭に分かれる。玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石 (An 36-89 %, Cu 2.8-35.7 ppm) 及びデイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石 (An 13-57 %, Cu 8.4-17.9 ppm) は An 値の減少と共に Cu 含有量が増加する傾向を示し、上記の 2 試料の分析値は連続的かつ直線的な組成トレンドを示す(図 29)。一方、マイクロ花崗岩中の短柱状斜長石 (An 11-38 %, Cu 0.5-5.1 ppm)、デイサイト質エンクレーブ中の短柱状斜長石 (An 4-41 %, Cu 0.0-3.8 ppm)、安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石 (An 12-55 %, Cu 0.8-4.4 ppm) は An 値の変化と無関係に低い Cu 含有量を示す。特

に、デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石と An 値の範囲と産状が類似する安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石とは、明瞭な Cu 含有量の差を示す。また、同一試料に共存しており、An 値も重複する短柱状斜長石とも明瞭な含有量の差を示す。Zn は全試料において、An 値に無関係に含有量の幅が大きく、明瞭な組成トレンドは認められない。Pb は Ce と同様に 2 つの明瞭な組成トレンドを示す。玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石は An 値 60 %以上において、0-1.5 ppm の Pb 含有量を示し、デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石以外の試料では、An 値の減少と共に Pb 含有量が増加する組成トレンドを示す。一方、デイサイト質エンクレーブ中の長柱状斜長石は、著しく Pb 含有量は低く、An 値の減少に相関のある含有量の増減が認められない。また、An 値の範囲と形状が類似する安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石及び、同一試料に共存し、An 値の範囲が重複する短柱状斜長石と明瞭な組成差を示す。

デイサイト質エンクレーブに含まれる短柱状斜長石は偏光顕微鏡下及び BSE 像で同心円状の累帯構造を示す(図 30a)。特に BSE 像では、中心部から外縁部にかけて An 値が減少していくものの、外縁部のやや内側に比較的高い An 値を示すゾーンが存在する(図 30a & b)。この An 値が高いゾーンとその内側の An 値が低いゾーンの境界は、波型ないし鋸刃型を示す(図 30a & b)。この累帯構造を横断するように LA-ICP-MS を用いて元素組成分析を行った結果、中心部から外縁部にかけて An 値が低下する過程において、BSE 像で相対的に明色を示すゾーンで An 値が高い値を示した(図 30c & d)。また、Cu 含有量は An 値が高いゾーンで相対的に高い値を示したが、誤差を考慮すると、有意な差は認められなかった。同様に、FeO 含有量も変化が認められなかった(図 30c & d)。

表 11 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩に含まれる短柱状斜長石の元素組成
(代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %.	N1_P11	N1_P12	N1_P13	N1_P14	N1_P15	N1_P16	N1_P17	N1_P18	N1_P19	N1_P10
SiO ₂	61.0	62.3	60.5	59.8	60.6	60.9	62.0	60.4	59.4	61.0
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	23.1	22.6	24.5	25.1	24.2	23.5	22.8	23.9	25.5	23.7
FeO	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3
CaO	6.0	4.8	5.6	6.0	6.0	5.9	4.1	6.4	6.3	6.1
Na ₂ O	9.0	9.2	8.6	8.4	8.6	9.0	9.4	8.5	8.0	8.5
K ₂ O	0.6	0.8	0.5	0.4	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	1.2	0.9	1.1	0.9	1.4	1.5	1.1	0.8	0.7	1.4
V	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0
Cr	5.3	6.9	8.1	13.1	2.5	6.7	12.3	7.9	14.8	20.7
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
Cu	1.4	1.4	1.0	1.3	1.0	1.1	1.8	1.4	1.6	1.1
Zn	5.3	4.6	5.8	7.2	6.7	7.1	9.0	6.0	6.8	5.5
Ga	23.3	23.1	22.7	22.2	23.6	24.8	21.6	24.9	21.6	22.5
Rb	9.7	1.7	0.3	0.2	0.5	0.7	5.0	0.6	0.3	0.5
Sr	483.4	406.6	481.0	531.0	540.9	551.7	245.2	476.5	517.4	457.2
Y	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cs	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Ba	403.9	521.1	469.8	402.4	408.3	427.1	739.2	456.5	448.0	508.8
La	6.1	4.8	4.5	4.3	4.6	4.5	5.4	5.9	6.6	7.1
Ce	9.3	5.7	6.5	6.8	5.9	6.1	7.1	9.7	9.8	9.9
Pr	0.8	0.5	0.5	0.4	0.4	0.6	0.6	0.8	0.8	1.0
Nd	2.4	0.7	1.1	1.7	1.1	1.7	1.9	2.6	2.3	3.3
Sm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0
Eu	2.6	3.1	4.2	4.8	4.2	3.9	1.9	2.3	2.7	2.6
Gd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ho	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Er	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	4.2	3.8	4.0	4.2	4.0	3.6	3.8	4.0	4.1	4.0
An	26.3	21.5	25.8	27.6	27.1	26.0	18.5	28.5	29.6	27.8
Ab	70.8	74.3	71.5	70.0	70.4	71.6	77.2	68.7	67.9	69.7
Or	3.0	4.1	2.7	2.4	2.5	2.4	4.3	2.8	2.5	2.6

表 12 牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブに含まれる短柱状斜長石の元素組成 (代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %.	N229c_TPI1	N229c_TPI2	N229c_TPI3	N229c_TPI4	N229c_TPI5	N229c_TPI6	N229c_TPI7	N229c_TPI8	N229c_TPI9	N229c_TPI10
SiO ₂	58.5	57.4	61.2	61.5	61.3	63.5	61.6	62.3	60.9	56.4
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	24.8	26.0	23.9	22.9	23.4	21.4	22.9	22.8	23.9	26.1
FeO	0.3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
CaO	7.7	8.5	5.7	5.9	5.6	4.9	5.5	5.5	5.3	9.3
Na ₂ O	7.6	7.2	8.3	8.7	8.8	9.1	9.0	8.5	9.0	7.0
K ₂ O	0.5	0.4	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.7	0.7
Total	99.4	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9
ppm										
Li	0.1	0.0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
V	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
Cr	7.2	6.1	1.0	4.9	8.0	0.9	3.4	3.3	1.0	8.7
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	1.5	1.2	2.3	2.2	1.4	1.3	1.6	1.5	1.7	1.0
Zn	10.1	22.5	9.5	20.0	10.4	8.7	17.1	8.9	13.5	12.2
Ga	24.1	25.2	19.8	21.2	23.1	24.4	19.8	19.2	24.3	23.6
Rb	0.9	0.9	0.9	0.7	1.1	1.7	1.0	0.8	0.8	24.7
Sr	530.1	626.6	465.1	461.5	456.1	408.6	465.5	427.8	456.6	771.3
Y	140.6	0.4	0.2	0.5	0.4	0.4	0.2	0.3	0.5	0.7
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	361.8	297.5	468.8	465.8	581.8	643.0	643.3	588.8	649.2	210.6
La	78.2	5.4	6.8	7.5	6.3	7.5	7.4	8.1	8.4	4.5
Ce	204.5	8.0	10.8	10.4	9.9	10.0	10.6	10.9	11.5	7.0
Pr	27.0	0.7	0.9	0.7	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7
Nd	106.1	1.9	3.4	2.4	2.7	2.0	4.0	3.8	3.1	1.8
Sm	27.9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Eu	2.8	1.8	2.7	2.5	2.8	2.8	4.0	2.9	2.7	1.4
Gd	24.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tb	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dy	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ho	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Er	14.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tm	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	8.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lu	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	4.1	4.5	4.2	4.4	4.5	4.6	4.4	4.8	5.2	4.1
An	35.0	38.7	26.4	26.5	25.1	21.8	24.4	25.5	23.4	40.8
Ab	62.4	59.1	70.4	70.4	71.6	73.7	72.2	71.2	73.0	55.5
Or	2.6	2.2	3.2	3.1	3.3	4.5	3.4	3.3	3.5	3.7

表 13 牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブに含まれる長柱状斜長石の
元素組成 (代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %.	N229c_LPI1	N229c_LPI2	N229c_LPI3	N229c_LPI4	N229c_LPI5	N229c_LPI6	N229c_LPI7	N229c_LPI8	N229c_LPI9	N229c_LPI10
SiO ₂	62.3	59.4	61.1	57.0	55.4	56.6	58.2	59.5	57.0	57.0
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	25.3	26.1	24.4	28.0	29.1	29.0	27.7	26.4	27.7	28.2
FeO	0.2	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3	0.4	0.4
CaO	3.2	7.5	7.3	7.5	8.8	7.3	6.6	6.1	7.7	7.4
Na ₂ O	8.5	6.2	6.3	6.6	5.9	6.3	6.7	7.2	6.7	6.6
K ₂ O	0.5	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.4
Total	100.0	100.0	99.9	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	99.9	100.0
ppm										
Li	0.7	0.0	0.7	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
V	0.0	0.2	0.0	0.3	0.6	0.4	0.2	0.0	0.3	0.0
Cr	26.6	14.7	12.3	13.2	0.0	6.8	0.0	9.6	18.1	3.8
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	16.0	13.4	13.8	13.1	11.2	11.4	12.4	13.8	12.5	13.0
Zn	1.6	6.3	9.7	11.3	6.5	5.7	4.9	6.3	6.3	3.9
Ga	19.7	28.9	28.3	27.3	22.5	17.8	19.4	24.9	20.2	20.6
Rb	0.9	0.0	0.2	0.2	0.2	0.5	0.4	0.3	0.3	0.5
Sr	473.8	812.1	767.1	834.9	725.2	782.9	556.3	506.0	647.7	652.0
Y	0.0	0.2	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cs	523.5	299.8	223.1	312.3	178.7	421.4	529.9	325.4	314.1	453.4
Ba	6.1	5.1	3.6	4.9	2.3	6.9	5.8	4.8	5.0	6.7
La	8.4	7.6	6.0	7.3	5.8	8.9	9.5	8.2	8.7	10.4
Ce	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	1.2	0.7	0.7	0.8	0.8
Pr	1.3	1.6	1.5	1.8	0.8	1.1	1.3	1.1	1.5	1.9
Nd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sm	2.7	2.9	1.3	1.7	1.2	2.4	2.0	1.7	1.6	2.3
Eu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gd	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dy	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ho	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Er	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
An	16.9	39.3	38.2	38.0	44.5	38.2	34.3	31.1	37.9	37.2
Ab	80.1	58.8	60.2	60.4	54.0	59.9	62.9	66.1	59.9	60.3
Or	3.0	1.9	1.6	1.6	1.5	1.9	2.7	2.8	2.2	2.6

表 14 牛沢又北岩体に産する安山岩質エンクレーブに含まれる長柱状斜長石の元素組成(代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %.	N227_P11	N227_P12	N227_P13	N227_P14	N227_P15	N227_P16	N227_P17	N227_P18	N227_P19	N227_P110
SiO ₂	61.0	64.3	54.6	61.7	55.3	62.3	63.3	61.2	63.2	61.1
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	24.3	22.6	27.9	23.9	27.1	23.4	23.4	24.3	22.9	24.7
FeO	0.4	0.2	0.6	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.2	0.2
CaO	7.4	3.3	10.9	5.5	11.7	5.0	4.5	4.9	5.0	6.6
Na ₂ O	6.4	9.1	5.6	8.0	5.2	8.5	8.1	8.9	8.3	7.0
K ₂ O	0.4	0.5	0.2	0.5	0.1	0.5	0.4	0.4	0.5	0.3
Total	99.9	100.0	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
ppm										
Li	2.6	0.0	0.0	0.0	2.9	3.3	1.8	1.6	2.9	0.5
V	0.7	0.0	1.5	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cr	3.0	0.0	10.8	5.6	6.7	7.8	0.4	5.1	9.1	0.0
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ni	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	3.0	1.8	4.4	2.2	1.0	1.8	2.4	2.6	1.8	0.8
Zn	0.4	1.4	9.6	3.2	3.4	4.3	3.4	0.7	0.0	4.7
Ga	20.9	25.1	23.3	24.7	23.5	22.2	28.9	19.8	25.9	25.5
Rb	1.4	2.1	0.0	1.3	0.2	1.5	1.0	0.9	1.1	0.6
Sr	618.4	376.0	742.4	490.2	917.1	359.8	420.5	408.3	418.0	542.4
Y	1.2	0.0	0.6	0.2	0.0	0.3	0.6	0.4	0.0	0.8
Sn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cs	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ba	214.5	600.1	79.8	399.7	140.3	401.8	378.4	454.7	418.6	253.8
La	4.0	4.7	1.6	5.2	2.6	5.6	5.9	5.4	5.8	6.0
Ce	5.1	6.0	2.8	7.6	3.5	7.4	7.6	6.6	7.7	8.2
Pr	0.4	0.4	0.0	0.2	0.0	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6
Nd	2.0	0.7	0.0	2.0	0.0	0.5	3.7	0.3	0.0	1.9
Sm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Eu	1.7	2.0	0.0	2.8	0.0	1.8	2.2	1.7	2.0	1.9
Gd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ho	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Er	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	2.4	3.7	0.5	3.5	1.0	3.3	3.7	3.1	4.1	3.1
An	38.0	16.3	51.4	26.7	54.7	24.0	22.9	22.8	24.2	33.6
Ab	59.7	80.9	47.7	70.5	44.5	73.4	74.7	74.8	72.9	64.5
Or	2.3	2.7	0.9	2.8	0.8	2.6	2.5	2.4	2.8	2.0

表 15 牛沢又東岩体に産する玄武岩質エンクレーブに含まれる長柱状斜長石の元素組成(代表値：LA-ICP-MS による)

wt. %.	EMME_P11	EMME_P12	EMME_P13	EMME_P14	EMME_P15	EMME_P16	EMME_P17	EMME_P18	EMME_P19	EMME_P10
SiO ₂	47.6	47.6	47.6	47.0	50.7	50.3	59.2	49.8	49.7	49.7
TiO ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al ₂ O ₃	35.0	34.4	35.0	34.0	31.6	31.3	25.7	32.8	33.3	32.5
FeO	0.6	0.6	0.6	0.7	0.9	0.7	0.4	0.7	0.6	0.7
CaO	14.4	14.7	14.3	16.0	14.1	15.1	8.6	14.3	13.7	14.8
Na ₂ O	2.1	2.5	2.3	2.0	2.5	2.4	5.7	2.2	2.4	2.2
K ₂ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0
Total	99.8	99.8	99.8	99.9	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9
ppm										
Li	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.3	0.9	0.5
V	1.5	1.6	1.0	1.5	3.8	2.3	0.8	1.4	2.2	1.1
Cr	47.3	63.3	18.0	118.1	363.9	85.5	14.8	10.1	35.8	11.2
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Co	0.0	0.2	0.0	0.0	1.3	0.1	0.4	0.1	0.3	0.0
Ni	0.0	0.0	0.0	1.1	67.0	6.9	8.8	0.0	0.0	0.0
Cu	4.2	6.2	3.3	4.0	8.5	5.6	13.0	3.5	4.9	3.7
Zn	0.0	3.1	0.3	0.9	11.2	5.9	8.3	5.2	2.7	5.9
Ga	11.9	13.8	17.8	15.9	15.7	15.1	26.1	17.0	16.0	19.2
Rb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	1.0	0.0	0.1	0.0
Sr	554.0	551.8	573.8	599.6	501.1	521.8	698.4	529.4	516.7	627.2
Y	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Sn	0.0	0.7	0.0	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Cs	24.0	19.5	14.9	22.3	18.9	30.3	158.2	16.7	26.1	36.8
Ba	0.1	0.0	0.0	0.5	0.4	0.2	3.0	0.1	0.3	0.6
La	0.4	0.9	0.5	0.4	0.5	0.8	4.9	0.7	0.7	1.3
Ce	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.1	0.0	0.1
Pr	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
Nd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.1
Eu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gd	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Dy	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ho	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Er	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Tm	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Yb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pb	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
An	78.8	76.5	77.3	81.0	75.8	77.2	44.4	78.1	75.4	78.4
Ab	20.9	23.2	22.5	18.8	24.0	22.5	53.9	21.7	24.3	21.4
Or	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	1.7	0.2	0.3	0.2

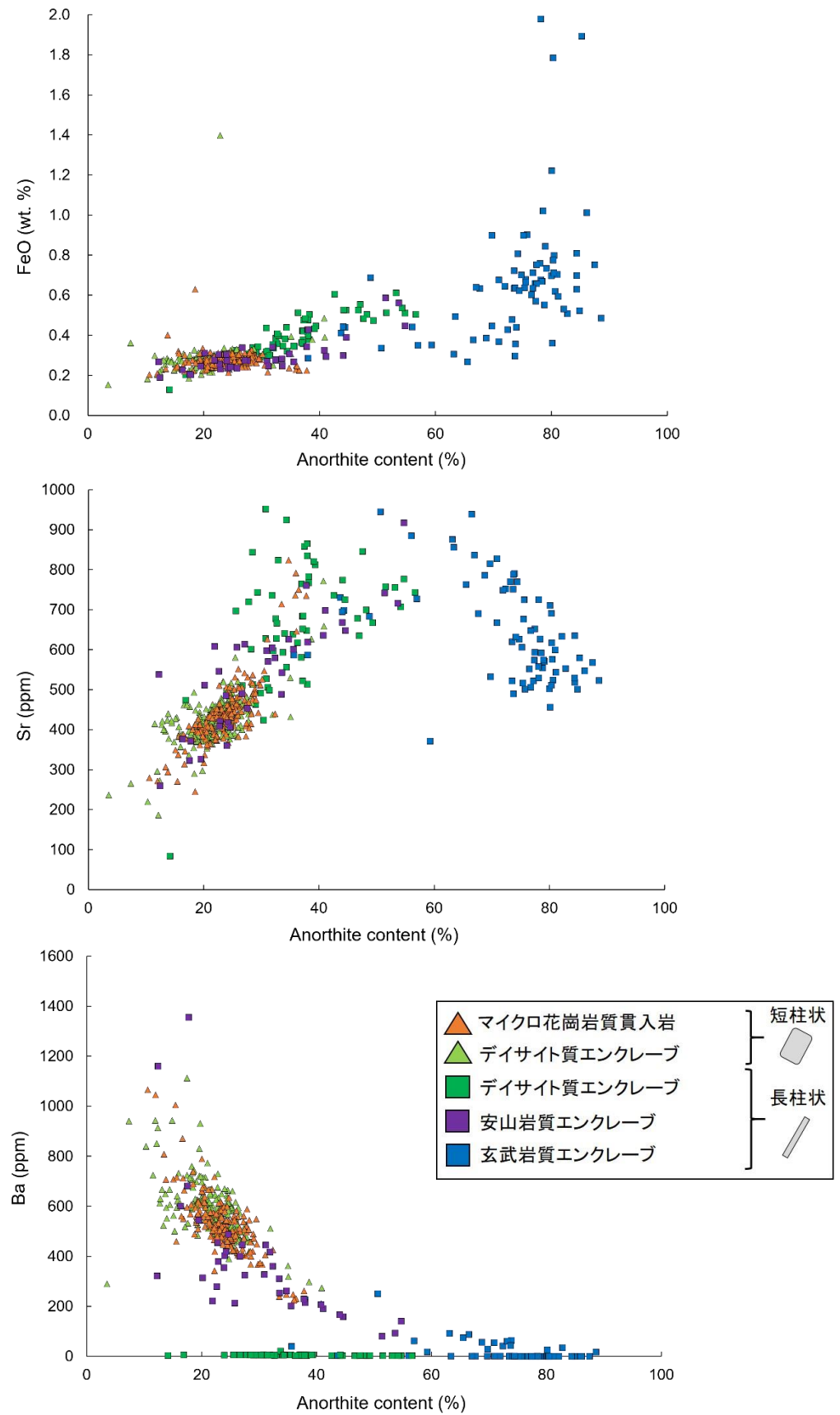


図 26 貫入岩及びエンクレーブに含まれる斜長石の準主要元素(FeO, Sr, Ba)組成

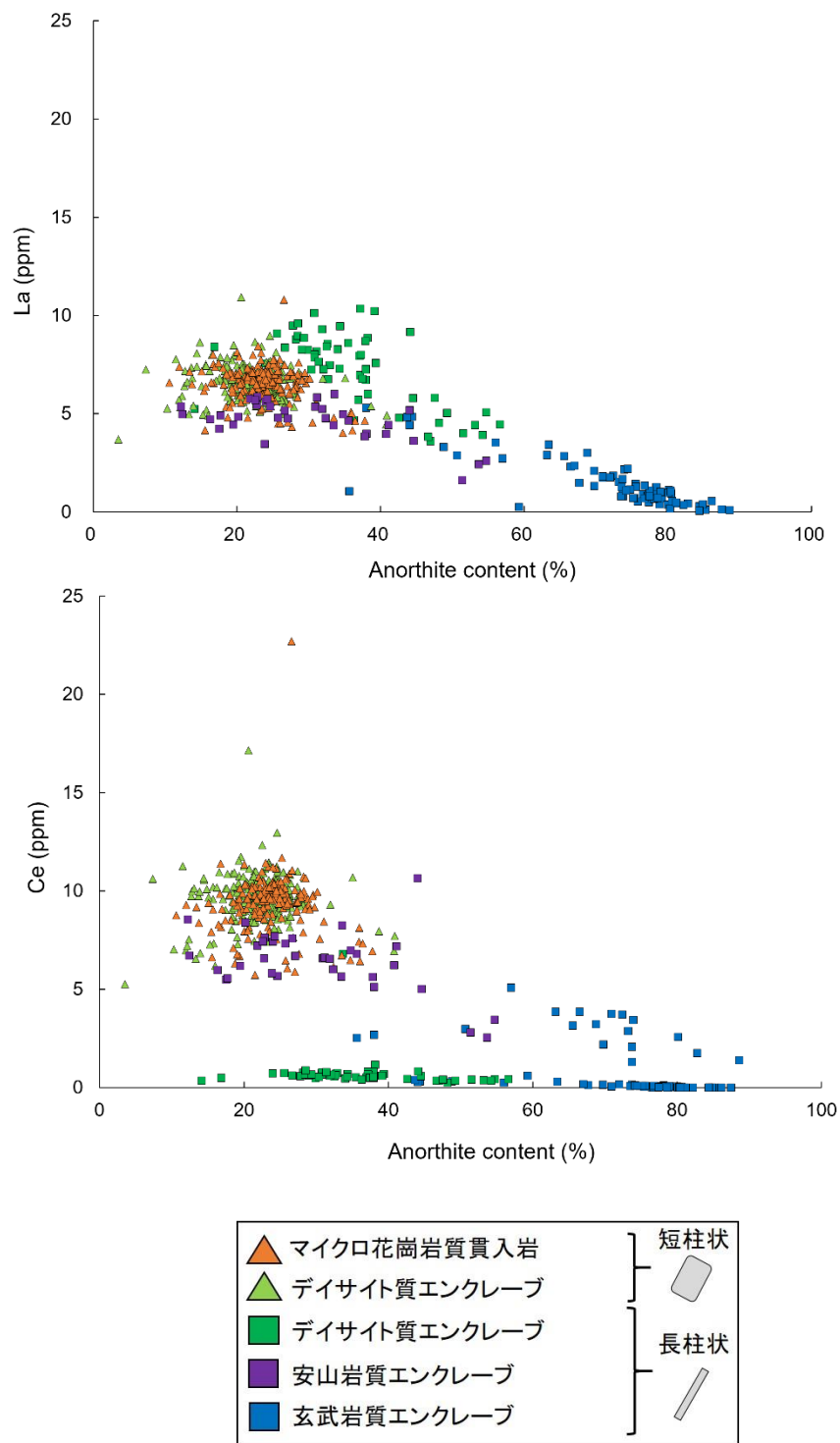


図 27 貫入岩及びエンクレーブに含まれる斜長石の軽希土類(La, Ce)組成

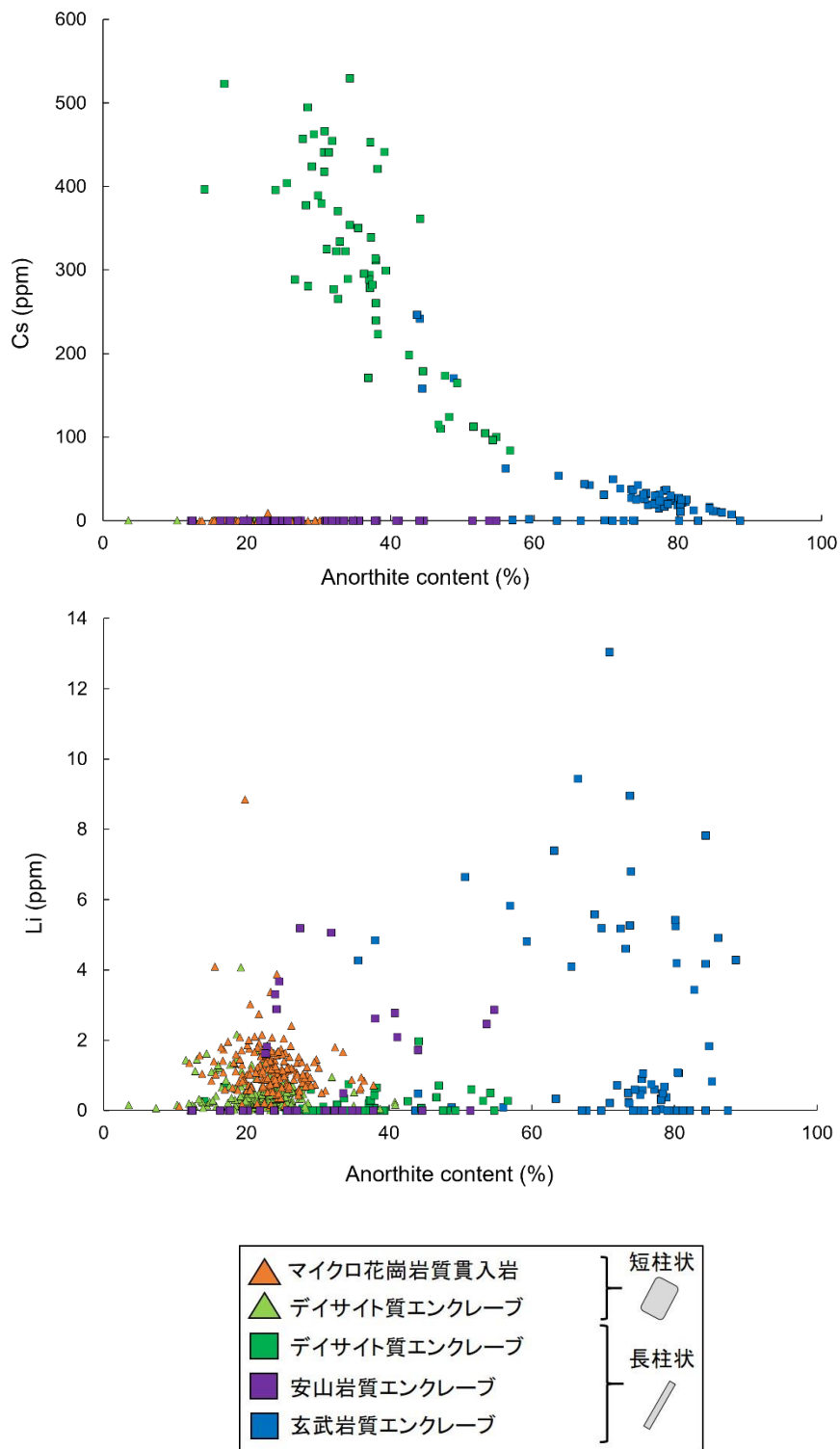


図 28 貫入岩及びエンクレーブに含まれる斜長石の半揮発性元素(Cs, Li)組成

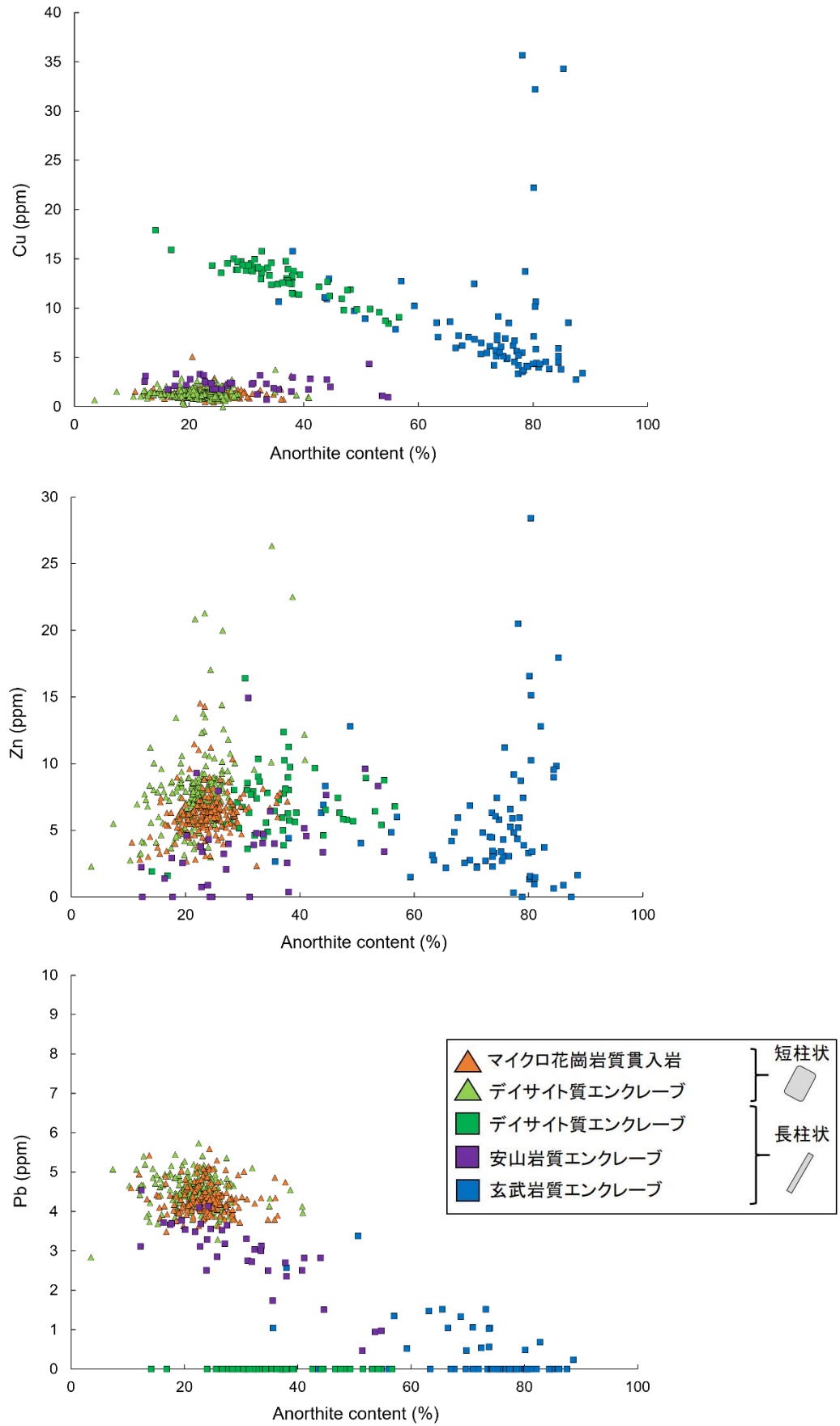


図 29 貫入岩及びエンクレーブに含まれる斜長石の鉱床濃集元素(Cu, Zn, Pb)組成

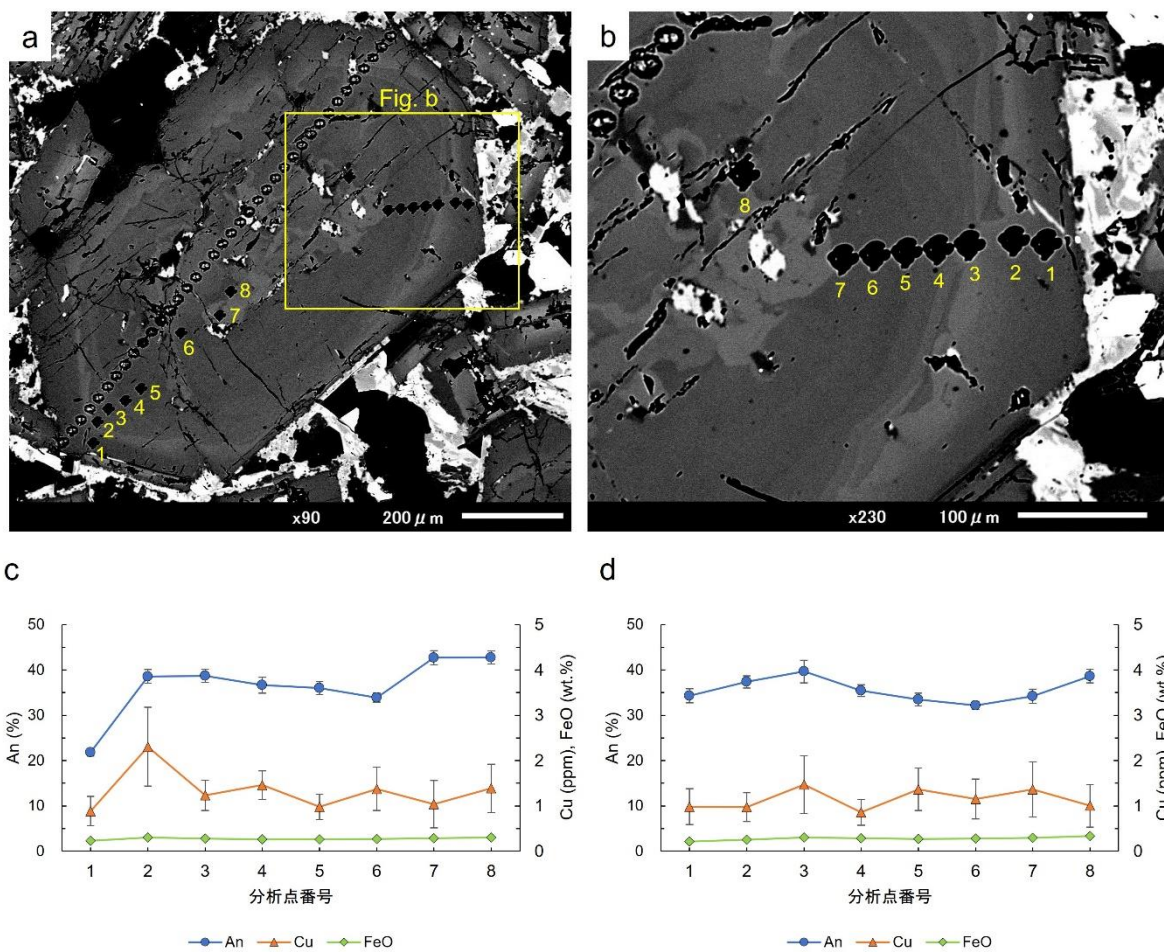


図 30 デイサイト質エンクレーブに含まれる短柱状斜長石の累帯構造とその元素組成変化

- a. 自形を示す短柱状斜長石の BSE 像. LA-ICP-MS による分析点番号を図中に示す.
 b. 図 a の一部拡大図. LA-ICP-MS による分析点番号を図中に示す. c. 図 a 中の分析点ごとの An 値及び元素組成変化. d. 図 b 中の分析点ごとの An 値及び元素組成変化.

7.4. 燐灰石

牛沢又北岩体のマイクロ花崗岩質貫入岩及び貫入岩中に産するデイサイト質エンクレーブの石基に含まれる燐灰石を対象に EPMA による分析を行った。

マイクロ花崗岩に含まれる燐灰石は、微的な副成分元素として SiO_2 が 0.00-3.01 wt. %, Na_2O が 0.14-0.42 wt. %, SO_3 が 0.00-0.77 wt. %, Ce_2O_3 が 0.27-1.21 wt. % 含まれる(表 16)。また、F は 1.37-3.95 wt. %, Cl は 0.61-1.26 wt. % を示す。F/(F + Cl) 原子比は、0.78-0.89 を示し、フッ素燐灰石の組成を示す。SO₃ 含有量は、Na₂O 含有量と明瞭な正の相関を示し、Liu and Comodi (1993) による $\text{S}^{6+} + \text{Na}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+}$ の複合置換関係及び、Tepper and Kuehner (1999) による $\text{Si}^{4+} + \text{Na}^+ = \text{S}^{6+} + \text{REE}^{3+} (\text{La}^{3+} + \text{Ce}^{3+})$ の複合置換関係を示す(図 31a & b)。

デイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石は、特徴的な副成分元素として SiO_2 が 0.27-3.47 wt. %, Na_2O が 0.14-0.59 wt. %, SO_3 が 0.00-0.92 wt. %, Y_2O_3 が 0.08-0.32 wt. %, Ce_2O_3 が 0.26-0.99 wt. % 含まれる(表 17)。また、F は 1.46-4.99 wt. %, Cl は 0.53-1.26 wt. % を示す。F/(F + Cl) 原子比は、0.75-0.93 を示し、フッ素燐灰石の組成を示す。SO₃ 含有量は、Na₂O 含有量と明瞭な正の相関を示し、Liu and Comodi (1993) による $\text{S}^{6+} + \text{Na}^+ = \text{Ca}^{2+} + \text{P}^{5+}$ の複合置換関係及び、Tepper and Kuehner (1999) による $\text{Si}^{4+} + \text{Na}^+ = \text{S}^{6+} + \text{REE}^{3+} (\text{La}^{3+} + \text{Ce}^{3+})$ の複合置換関係を示す(図 31c & d)。

表 16 牛沢又北岩体を構成するマイクロ花崗岩質貫入岩に含まれる燐灰石の元素組成(代表値：EPMA による)

wt. %	N1c_1	N1c_2	N1_3	N1c_4	N1c_5	N1c_6	N1c_7	N1c_8	N1c_9	N1c_10
P ₂ O ₅	40.21	39.35	39.98	37.88	38.76	38.16	39.58	39.42	39.76	39.03
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	2.21	0.52	0.50	0.17	0.06	0.00	3.01
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.03	0.01	0.04	0.38	0.05	0.07	0.12	0.04	0.04	0.56
FeO	0.26	0.35	0.14	0.44	0.22	0.24	0.71	0.16	0.18	0.22
MgO	0.06	0.07	0.05	0.04	0.05	0.04	0.11	0.06	0.05	0.03
CaO	54.57	54.60	54.54	53.12	53.01	52.73	54.58	54.48	55.18	52.10
Na ₂ O	0.19	0.24	0.19	0.21	0.31	0.34	0.21	0.26	0.20	0.42
SO ₃	0.25	0.31	0.24	0.01	0.48	0.50	0.10	0.15	0.14	0.02
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
La ₂ O ₃	0.18	0.27	0.16	0.33	0.35	0.31	0.17	0.26	0.22	0.23
Ce ₂ O ₃	0.40	0.35	0.33	0.69	0.60	0.65	0.48	0.42	0.32	0.70
MnO	0.13	0.14	0.17	0.15	0.17	0.13	0.15	0.16	0.14	0.20
F	3.21	3.39	3.29	1.37	2.73	3.46	1.77	1.80	1.85	2.57
Cl	0.98	0.92	0.73	0.73	0.97	0.99	0.90	0.72	0.69	0.77
Total	98.89	98.35	98.31	96.83	96.85	96.44	98.11	97.08	97.83	98.58
P	5.423	5.562	5.631	5.480	5.565	5.492	5.659	5.683	5.686	5.452
Si	0.000	0.000	0.000	0.378	0.088	0.085	0.029	0.010	0.000	0.497
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000
Al	0.006	0.002	0.008	0.077	0.010	0.014	0.024	0.008	0.008	0.109
Fe	0.035	0.049	0.019	0.063	0.031	0.034	0.100	0.023	0.025	0.030
Mg	0.014	0.017	0.012	0.010	0.013	0.010	0.028	0.015	0.013	0.007
Ca	9.315	9.767	9.721	9.725	9.632	9.605	9.876	9.940	9.986	9.210
Na	0.059	0.078	0.061	0.070	0.102	0.112	0.069	0.086	0.065	0.134
S	0.030	0.039	0.030	0.001	0.061	0.064	0.013	0.019	0.018	0.002
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
La	0.011	0.017	0.010	0.021	0.022	0.019	0.011	0.016	0.014	0.014
Ce	0.023	0.021	0.020	0.043	0.037	0.040	0.030	0.026	0.020	0.042
Mn	0.018	0.020	0.024	0.022	0.024	0.019	0.021	0.023	0.020	0.028
F	1.617	1.790	1.731	0.740	1.464	1.860	0.945	0.969	0.988	1.341
Cl	0.265	0.260	0.206	0.211	0.279	0.285	0.258	0.208	0.198	0.215
Total	16.815	17.623	17.474	16.840	17.329	17.640	17.061	17.030	17.041	17.083

表 17 牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石の元素組成(代表値：EPMA による)

wt. %	N229c_1	N229c_2	N229c_3	N229c_4	N229c_5	N229c_6	N229c_7	N229c_8	N229c_9	N229c_10
P ₂ O ₅	39.48	39.73	39.00	39.64	39.40	39.37	39.67	39.54	39.60	38.98
SiO ₂	0.51	0.57	0.59	0.50	0.52	0.49	0.55	0.49	0.39	1.15
TiO ₂	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.23
FeO	0.30	0.26	0.24	0.25	0.28	0.32	0.33	0.32	0.34	0.31
MgO	0.05	0.06	0.04	0.07	0.05	0.03	0.06	0.05	0.06	0.01
CaO	54.65	54.31	54.74	54.38	54.37	54.15	54.42	54.37	54.22	53.53
Na ₂ O	0.35	0.37	0.45	0.42	0.39	0.41	0.47	0.39	0.36	0.34
SO ₃	0.62	0.59	0.70	0.57	0.64	0.66	0.69	0.67	0.51	0.36
SrO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Y ₂ O ₃	0.19	0.18	0.20	0.19	0.21	0.21	0.21	0.18	0.18	0.29
La ₂ O ₃	0.17	0.15	0.22	0.16	0.21	0.15	0.23	0.14	0.17	0.23
Ce ₂ O ₃	0.49	0.42	0.52	0.38	0.42	0.41	0.56	0.40	0.41	0.51
MnO	0.15	0.17	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.12	0.18	0.13
F	3.14	3.71	3.21	3.21	2.98	3.30	4.23	3.02	3.37	2.83
Cl	0.90	0.85	0.91	0.91	0.68	0.84	0.91	0.90	0.89	1.15
Total	99.52	99.64	99.43	99.31	98.95	98.95	100.56	99.19	99.10	98.60
P	5.309	5.508	5.458	5.531	5.529	5.514	5.451	5.529	5.538	5.494
Si	0.080	0.093	0.098	0.082	0.086	0.081	0.089	0.081	0.064	0.192
Ti	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000
Al	0.007	0.007	0.007	0.009	0.012	0.009	0.011	0.010	0.012	0.046
Fe	0.040	0.035	0.034	0.034	0.038	0.045	0.045	0.045	0.047	0.044
Mg	0.012	0.016	0.010	0.018	0.012	0.008	0.015	0.012	0.014	0.002
Ca	9.301	9.530	9.694	9.604	9.654	9.597	9.462	9.622	9.597	9.547
Na	0.109	0.119	0.145	0.134	0.126	0.131	0.148	0.126	0.114	0.109
S	0.074	0.072	0.087	0.071	0.079	0.082	0.084	0.083	0.063	0.045
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Y	0.016	0.016	0.017	0.017	0.019	0.018	0.018	0.016	0.016	0.025
La	0.010	0.009	0.013	0.009	0.013	0.009	0.014	0.008	0.010	0.014
Ce	0.028	0.025	0.031	0.023	0.025	0.025	0.033	0.024	0.025	0.031
Mn	0.020	0.023	0.020	0.022	0.021	0.021	0.021	0.017	0.024	0.019
Fe	1.579	1.921	1.676	1.673	1.561	1.725	2.172	1.580	1.758	1.487
Cl	0.242	0.235	0.255	0.255	0.191	0.235	0.249	0.252	0.249	0.325
Total	16.830	17.609	17.545	17.481	17.366	17.499	17.813	17.407	17.531	17.379

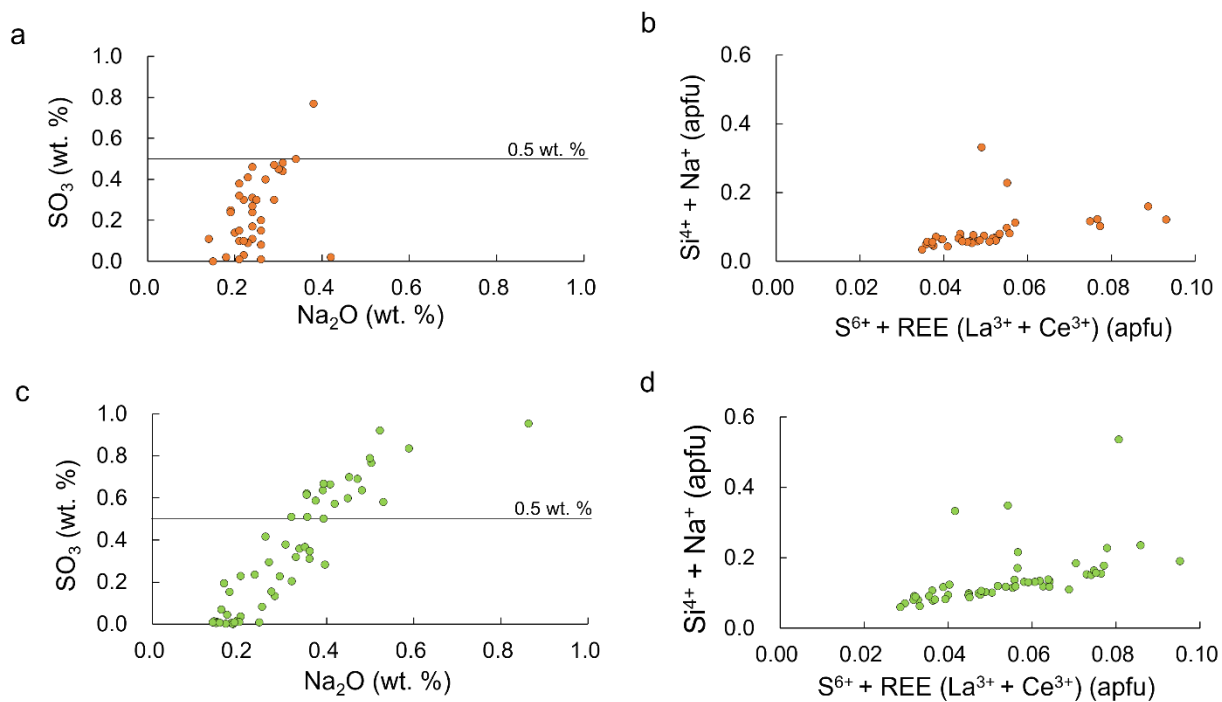


図 31 マイクロ花崗岩及びデイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石の元素組成

a & b. マイクロ花崗岩に含まれる燐灰石の元素組成. c & d. デイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石の元素組成. 特に a 及び c は Liu and Comodi (1993) による複合置換関係式に基づくプロット. また, b 及び d は Tepper and Kuehner (1999) による複合置換関係式に基づくプロット.

8. 考察

8.1. 鉱床関連火成岩の形成過程

8.1.1. 珪長質端成分マグマの性質

荒川銅鉱床形成と同時期に活動し、鉱床と連続的なマグマ-熱水系を形成する牛沢又岩体及び、牛沢又岩体に類似する産状、鉱物組成、全岩元素組成を示す牛沢又北岩体、牛沢又東岩体の貫入岩を構成する珪長質岩はマイクロ花崗岩及び斜長流紋岩である。これらの珪長質岩の示す角閃石及び磁鉄鉱を含む鉱物組み合わせは、島弧火成活動によって形成された中カリウム系列の I-type 及び磁鉄鉱系列花崗岩に分類される流紋岩質マグマの貫入によって形成された岩石であることを示す。また、これらの珪長質岩が示す高い Y 含有量、低い Sr/Y 値はアダカイト質花崗岩には該当しないことを示すと共に、ウェッジマンントル由来の典型的な島弧の流紋岩質マグマであることを示す。また、全岩及び角閃石から計算したメルトのコンドライト規格化希土類元素パターンにおける Eu の負異常は、斜長石に対する Eu の分配係数が大きいこと Bédard (2006)から、斜長石の結晶分化作用を経て形成されたことを示す。全岩元素組成における Zr, Nb, Ba, 軽希土類の濃集や高い Rb/Sr 値は結晶分化作用で形成された流紋岩質マグマであることを示す。このことは、斜長石の An 値が最大 38 %であることも調和的である。

Ridolfi and Renzulli (2012)の角閃石温度圧力計を用いて角閃石晶出時の温度圧力を計算すると、約 788-831 °Cと温度と約 0.7-1.0 kbar の圧力が得られた(図 32)。地下浅所の岩石及びマグマの比重を 2.5 とした場合、この圧力は約 2.8-4.0 km の深度に相当する。Ridolfi and Renzulli (2012)の酸素分圧計によると前述の温度範囲において、 $\log fO_2$

=-13.2- -11.7 の酸素分圧が得られた(図 33). この値は, $\Delta\text{NNO}+1-2$ を示し, 硫化物-硫黄酸化物緩衝曲線(SSO)よりも高い値となり, マグマ性硫化物の非安定的な酸化状態であることを示唆する. 銅及び硫黄をマグマ性硫化物として固定せず, 効率的に熱水系へ放出することが可能な酸化状態を示すことは, 斑岩型銅鉱床を形成する珪長質な貫入岩の特徴と調和的である(例えば, Hedenquist and Lowenstern, 1994; Mungall, 2002; Richards, 2015 など). また, Ridolfi and Renzulli (2012)のメルトの水分量計を用いると角閃石晶出時のメルトの水分量は約 3.4-3.9 wt.%となり, Moore et al. (1998)による流紋岩質メルト(850 °C)の水分飽和量に近い値を示し, 水に富んだマグマであったことを示唆する(図 34).

マイクロ花崗岩質貫入岩の石基に含まれる燐灰石は SO_3 を 0.00-0.77 wt. %を含み, $>\text{NNO}+1$ ($>\text{SSO}$)の比較的高い酸素分圧で形成されたことを示唆する(Parat et al., 2011). さらに, Parat et al. (2011)による燐灰石-メルト間における硫黄の分配を表す数式の有効範囲内においては, 硫酸塩鉱物として晶出する飽和量(約 0.03 wt. %)より低いメルト中の硫黄含有量を示し, マグマ性硫酸塩鉱物が欠如することと矛盾しない.

8.1.2. 苦鉄質端成分マグマの性質

牛沢又岩体及び牛沢又北岩体, 牛沢又東岩体の珪長質貫入岩には, 特徴的にマグマ性エンクレーブが含まれる. それらの中で最も苦鉄質なエンクレーブを形成したマグマを荒川銅鉱床の形成に関係したマグマ系における苦鉄質端成分としてその性質を検討する.

この最も苦鉄質なエンクレーブは単斜輝石含有角閃石斑レイ岩であり, 全岩元素組成では, サブアルカリ岩系の玄武岩及び玄武岩質安山岩の元素組成を示す. コンドラ

イトで規格化した全岩希土類元素パターン及び角閃石，単斜輝石の平均希土類元素含有量から分配係数(Green et al., 2000; Adam and Green, 1994; Zhang et al., 2019)を用いて計算したメルトは，軽希土に富む希土類元素パターンを示す(図 35). これらの希土類元素パターンにおいて Eu の異常は認められない(図 19 & 35). また，Eu の正及び負の異常が認められないことは，この試料が斜長石の分別や集積を経ていないことを示唆する. また，N-MORB で規格化したスパイダー図(図 18a)では，LIL 元素及びイオン半径の比較的大きい HFS 元素に富む特徴を示し，比較的高い Zr/Nb 値(26.7, 39.4)を示すことは島弧玄武岩及び活動的大陸縁玄武岩の特徴と調和的である. 特に，島弧玄武岩で規格化したスパイダー図はフラットなパターンを示し，島弧玄武岩と不適合元素の含有量比が類似することを示す(図 18b). このことは，後期中新世の東北日本弧のテクトニックセッティングと矛盾せず，ウェッジマントル由来の典型的な島弧の玄武岩質マグマであることを示す. また，比較的高い Zr/Nb 値(26.7, 39.4)と Rb/Ba 値(0.09, 0.10)はカルクアルカリ岩系の玄武岩(高アルミナ玄武岩を含む)の特徴(藤縄, 1991)と調和的である.

これらの玄武岩質エンクレーブは角閃石に富む鉱物組み合わせ及び最大 89 %の高い An 値を示す斜長石を含むことで特徴づけられ，水に富むマグマであったことが示唆される. 特に，An 90 %程度の Ca に富む斜長石を晶出させる島弧ソレイト質玄武岩は，約 3 wt. %以上の含水量が必要であることが実験的に確認されている(Hamada and Fujii, 2007). また，Ridolfi and Renzulli (2012)の角閃石圧力計及びメルトの水分量計を用いると，最も高い圧力である約 2.1 kbar における含水量は，約 4.5-4.9 wt. %となることから，水に富む玄武岩マグマが固結して形成されたことを示す(図 34). しかし，この値は閉鎖系であるエンクレーブ内で斜長石や単斜輝石などの無水鉱物が先行

して晶出したために水が濃縮されている可能性が高く、玄武岩質マグマの注入時よりも高い含水量を示している可能性がある。

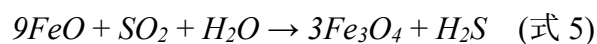
8.2. マグマ混合・混交過程

8.2.1. 玄武岩質エンクレーブの形成過程

牛沢又東岩体及び牛沢又岩体に産する玄武岩質エンクレーブは、流紋岩質マグマに玄武岩質マグマが注入し、相対的に急冷されたことにより楕円体形状をなすエンクレーブとして固結したことを示す。牛沢又東岩体の玄武岩質エンクレーブ及び牛沢又岩体のエンクレーブの外縁部に存在する幅 1-2 mm の珪質な反応縁は、組成差の大きいメルトが共存し、一方が冷却・結晶化する際にアップヒル拡散が生じたことを示す (Picher, 1997)。また、エンクレーブの外縁部に破断した結晶がみられないことも、これらのエンクレーブが捕獲岩やオートリスには該当しないことを示す。このように、メルトもしくは結晶を含むメルトどうしが混交して形成された苦鉄質エンクレーブは、マグマ性苦鉄質エンクレーブ (magmatic mafic enclave/magmatic microgranular enclave; MME) に分類される。

相対的に低温な流紋岩質マグマに注入した水に富む玄武岩質マグマは急冷され、閉鎖系において結晶化が進行する。早期晶出相の斜長石が長柱状であることは、冷却速度が大きいことを示す。また、単斜輝石の角閃石化は水に富む条件でのモーダル交代作用を示す。単斜輝石及び単斜輝石中のメルト包有物には硫化鉍物は認められないが、単斜輝石より後期に晶出した角閃石には、液滴状の斑銅鉍及び黄銅鉍が含まれる。このことは閉鎖系のエンクレーブ中で、角閃石の晶出時期に硫化物が安定な還元的環境に変化したことを示す。Ridolfi and Renzulli (2012) の角閃石温度圧力計を用いて角閃石晶出時の温度圧力を計算すると、約 786-901 °C の温度と約 1.3-2.1 kbar の圧力が得られた (図 32)。地下浅所の岩石及びマグマの比重を 2.5 とした場合、この圧力は約 5.2-

8.4 km の深度に相当し、比較的地下浅所の流紋岩質マグマに注入し、固結したことで調和的である。また、Ridolfi and Renzulli (2012)の酸素分圧計によると前述の温度範囲において、 $\log fO_2 = -11.3 - -14.2$ の酸素分圧が得られた。この値は、NNO 緩衝曲線付近の酸素分圧を示し、硫化物-硫黄酸化物緩衝曲線(SSO)よりも低い値となり、マグマ性硫化物の安定的な酸化状態であることを示すことと調和的である(図 33)。斜長石及び単斜輝石に遅れて晶出した角閃石の晶出時期において、磁鉄鉱を伴って硫化鉄物が晶出した酸化還元状態の変化の要因として、 SO_2 を酸化剤とした反応による酸化還元反応(式 5; Takagi and Tsukimura, 1997)が示唆される。



この酸化還元反応の存在は、角閃石の形成温度の低下とともに増加する Si (apfu)数の増加と共に、Mg#が上昇していることとも調和的である(図 20a)。長柱状斜長石の粒間に角閃石が充填する間粒状組織を呈するが、角閃石で充填されていない小規模な間隙には、自形性の高い緑泥石が含まれるが、周囲の斜長石は清澄であり、変質を受けていない。このことは、エンクレーブの結晶化末期に角閃石に分配されなかった余剰の水が結晶粒間に存在していたことを示す。

8.2.2. 安山岩質エンクレーブの形成過程

牛沢又北岩体に産する淡黒色安山岩質エンクレーブは、流紋岩質マグマに安山岩質マグマが注入し、相対的に急冷されたことにより楕円体形状をなすエンクレーブとして固結したことを示す。このエンクレーブには、玄武岩質エンクレーブの外縁部に見

られた珪質な帯(殻)は認められないものの、細粒な急冷周縁相を示す。このことは、組成差は小さいものの、結晶を含むメルトどうしが混交して形成されたマグマ性エンクレーブであることを示す。したがって捕獲岩やオートリスには該当しない。このエンクレーブも玄武岩質エンクレーブと同様に間粒状組織を示し、長柱状斜長石の粒間に角閃石及び石英が充填している。長柱状斜長石を主とする組織は、相対的に低温なマグマに注入した安山岩質マグマの冷却速度が大きかったことを示す。Ridolfi and Renzulli (2012)の角閃石温度圧力計を用いて角閃石晶出時の温度圧力を計算すると、約 723-840 °Cの温度と約 0.5-1.0 kbar の圧力が得られた(図 32)。地下浅所の岩石及びマグマの比重を 2.5 とした場合、この圧力は約 2.0-4.0 km の深度に相当し、比較的地下浅所の流紋岩質マグマに注入し、固結したものと調和的である。また、Ridolfi and Renzulli (2012)の酸素分圧計によると前述の温度範囲において、 $\log fO_2 = -11.8 - -14.9$ の酸素分圧が得られた(図 33)。この値は、 $\Delta NNO +1-2$ 付近の酸素分圧を示し、硫化物-硫黄酸化物緩衝曲線(SSO)と重複する値となり、比較的低温ではマグマ性硫化物の安定的な酸化状態であることを示す。Ridolfi and Renzulli (2012)のメルトの水分量計を用いると、含水量は約 3.1-4.4 wt. %となる(図 34)。また、斜長石の An 値は最大 55 % であり、玄武岩質エンクレーブの斜長石と一部重複した連続的な値を示すと共に、Ba や La などの微量元素組成も連続的であることから、玄武岩質エンクレーブを形成したマグマが分化して形成されたマグマによって形成されたことが示唆される。

8.2.3. デイサイト質エンクレーブの形成過程

牛沢又北岩体に産するデイサイト質エンクレーブは、流紋岩質マグマにデイサイト質マグマが注入し、相対的に急冷されたことにより楕円体形状をなすエンクレーブと

して固結したことを示す。このエンクレーブには、玄武岩質エンクレーブの外縁部に見られた珪質な反応縁は認められず、細粒な急冷周縁相も認められない。このことは、組成や温度の差が小さい結晶を含むメルトどうしが混交して形成されたマグマ性エンクレーブであることを示す。したがって捕獲岩やオートリスには該当しない。このエンクレーブは特徴的に長柱状斜長石と短柱状斜長石が共存し、An 値はそれぞれ 14-57%及び 4-41%であり、おおよそ重複しているものの、Cu や Cs といった半揮発性元素や Ba, Ce の含有量に明瞭な差を示し、両者の起源が異なることを示す。短柱状斜長石の An 値及び微量元素含有量は、エンクレーブをホストするマイクロ花崗岩質貫入岩中の短柱状斜長石と類似した値であり、この短柱状斜長石はマイクロ花崗岩に由来する斜長石であることが示唆される。この長柱状斜長石の An 値及び微量元素含有量は、玄武岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石と連続的な組成トレンドを示し、玄武岩質エンクレーブを形成したマグマが分化したマグマから晶出したことが示唆される。一方、安山岩質エンクレーブ中の長柱状斜長石と比較すると、An 値や FeO 及び Sr の含有量が類似するものの、Cu や Cs といった半揮発性元素や Ba, Ce の含有量が異なる。このことは、An 値 55%以上の斜長石を晶出させうる中間的なマグマ組成の段階で半揮発性元素の分離が発生していたことを示唆する。特に、安山岩質エンクレーブに含まれる角閃石組成から得られた温度と圧力はデイサイト質エンクレーブの温度と圧力に比べて双方が相対的に小さいため(図 32)、エンクレーブとして流紋岩質マグマだまり内で捕獲されるまでの冷却・減圧速度が大きいことが示唆されるため、斜長石の晶出よりも早期に揮発性成分及び Cu などの半揮発性元素がメルトから分離した可能性がある。

デイサイト質エンクレーブを形成したマグマは、An 値の範囲が類似する長柱状斜

長石を含む安山岩質エンクレーブと、同様に An 値の範囲が類似する短柱状斜長石を含むマイクロ花崗岩質貫入岩及び斜長流紋岩質貫入岩の全岩 SiO_2 , Al_2O_3 , $t\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 量に基づくマスバランス計算により、安山岩質マグマ(分化した玄武岩質マグマ)と流紋岩質マグマが 2:1 の混合比で混合したことを示唆する(図 36). 早期晶出鉱物としての斜長石を含むマグマどうしが混合する例は、薩摩硫黄島火山(Saito et al., 2002)などで報告されている.

デイサイト質エンクレーブに含まれる短柱状斜長石の累帯構造と元素組成の変化(図 30)は、結晶外縁部やや内側の相対的に An 値が高いゾーンにおいて FeO 及び Cu の増加が認められないことから、より苦鉄質なマグマの混合による温度上昇で形成された可能性は低いことが示唆される. したがって、脱ガスによるメルト中の水の減少によって斜長石のリキダス及びソリダスの傾きが変化し、一時的に An 値が上昇した可能性が示唆される. 特に、結晶外縁部やや内側の相対的に An 値が高いゾーンとその内側の低 An 値を示すゾーンの境界は、波型ないし鋸刃型を示すことから、既存の短柱状斜長石の結晶外縁部が温度上昇や減圧によって熔融され、メルトに吸収されたことを示す(Bennett et al., 2019). そのため、安山岩質マグマと流紋岩質マグマが混合した際に熔融し、その直後に脱ガスが発生したことが示唆される.

長柱状斜長石及び短柱状斜長石の粒間に産する角閃石を対象として、Ridolfi and Renzulli (2012)の角閃石温度圧力計を用いて角閃石晶出時の温度圧力を計算すると、約 729-850 °Cの温度と約 0.4-1.2 kbar の圧力が得られた(図 32). 地下浅所の岩石及びマグマの比重を 2.5 とした場合、この圧力は約 1.6-4.8 km の深度に相当し、比較的地下浅所の流紋岩質マグマと混合した後、より浅所の流紋岩質マグマに注入し、固結したとと調和的である. また、Ridolfi and Renzulli (2012)の酸素分圧計によると前述の温度

範囲において、 $\log f_{\text{O}_2} = -10.6 - -13.3$ の酸素分圧が得られた。この値は $\Delta\text{NNO} + 1-2$ 付近の酸素分圧を示し、硫化物-硫黄酸化物緩衝曲線(SSO)よりも高い値となり、マグマ性硫化物の不安定な酸化状態であることを示す(図 33)。銅及び硫黄をマグマ性硫化物として固定せず、効率的に熱水系へ放出することが可能な酸化状態を示すことは、斑岩型銅鉱床を形成する珪長質な貫入岩の特徴と調和的である(例えば、Hedenquist and Lowenstern, 1994; Mungall, 2002; Richards, 2015 など)。また、Ridolfi and Renzulli (2012)のメルトの水分量計を用いると、含水量は約 3.3-4.0 wt. %となる(図 34)。

デイサイト質エンクレーブの石基に含まれる燐灰石は SO_3 を 0.00-0.92 wt. %を含み、 $>\text{NNO} + 1$ ($>\text{SSO}$)の比較的高い酸素分圧で形成されたことを示唆する(Parat et al., 2011)。さらに、Parat et al. (2011)による燐灰石-メルト間における硫黄の分配を表す数式の有効範囲内においては、硫酸塩鉱物として晶出する飽和量(約 0.03 wt. %)より低いメルト中の硫黄含有量を示し、マグマ性硫酸塩鉱物が欠如することと矛盾しない。

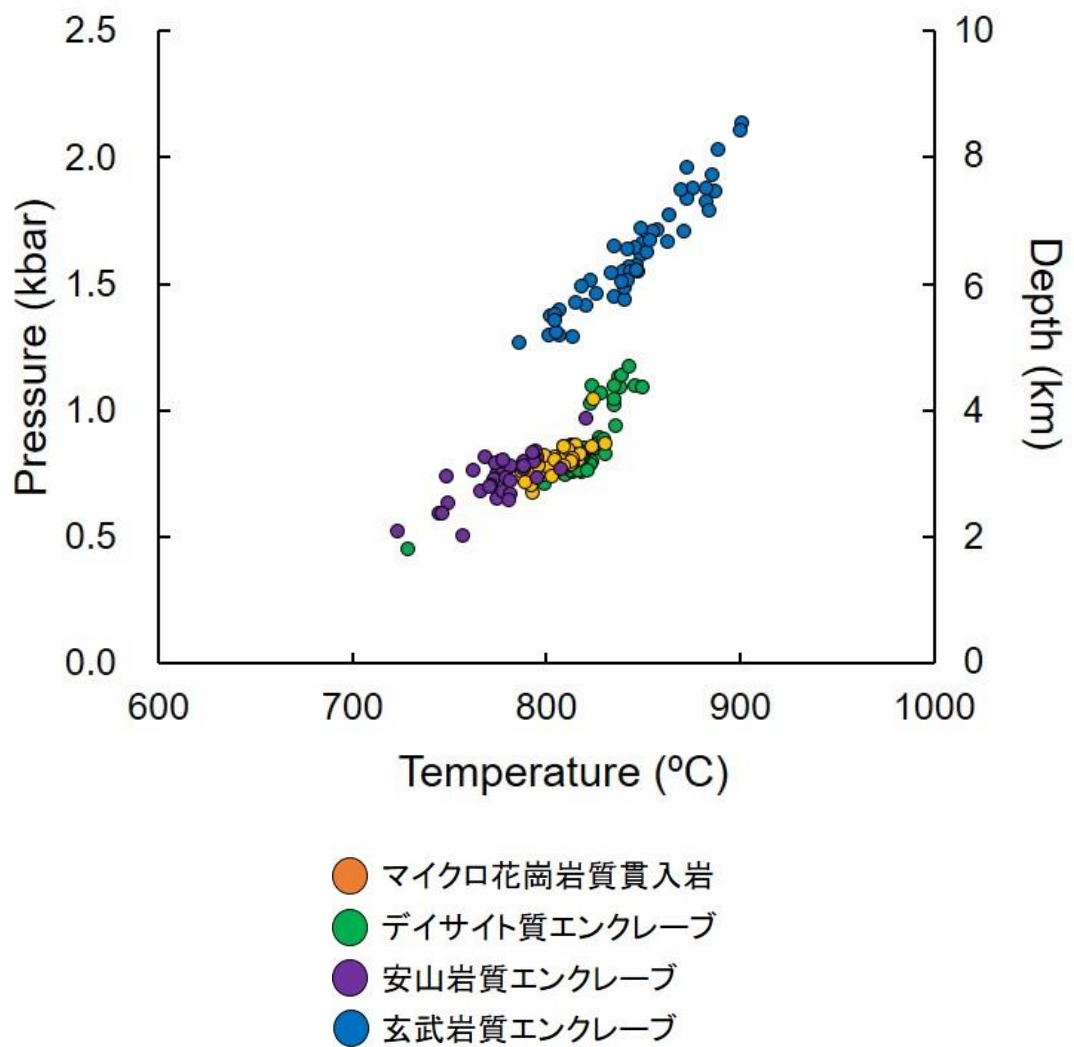
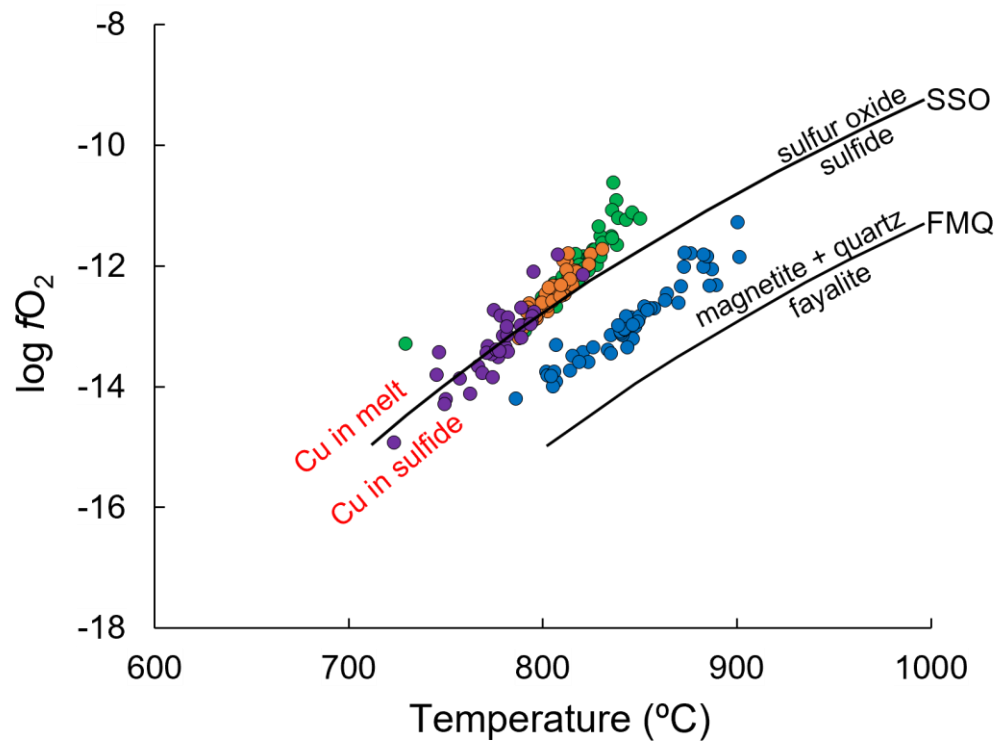


図 32 角閃石温度圧力計による荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石晶出時の温度圧力条件



- マイクロ花崗岩質貫入岩
- デイサイト質エンクレーブ
- 安山岩質エンクレーブ
- 玄武岩質エンクレーブ

図 33 角閃石温度計及び酸素分圧計による荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石晶出時の酸化還元状態

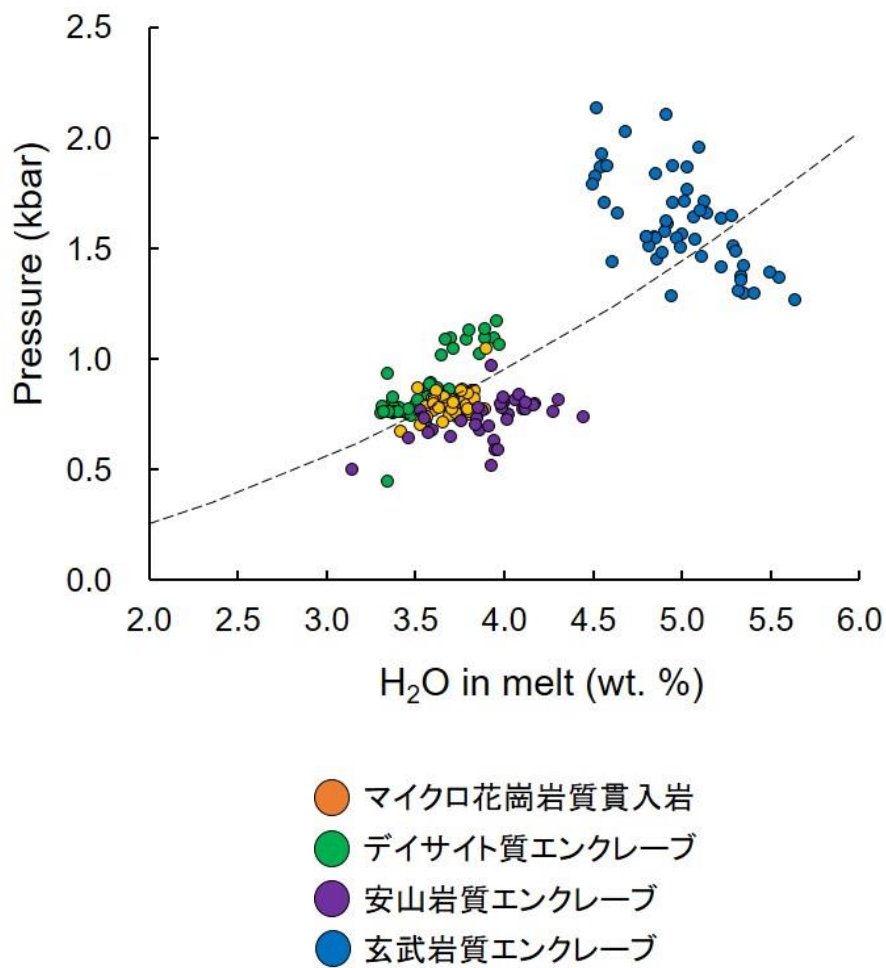


図 34 角閃石圧力計及び水分量計による荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石晶出時の圧力及びメルトの含水量

破線は Moore et al. (1998)による 850 °Cにおける流紋岩質マグマの水分飽和量

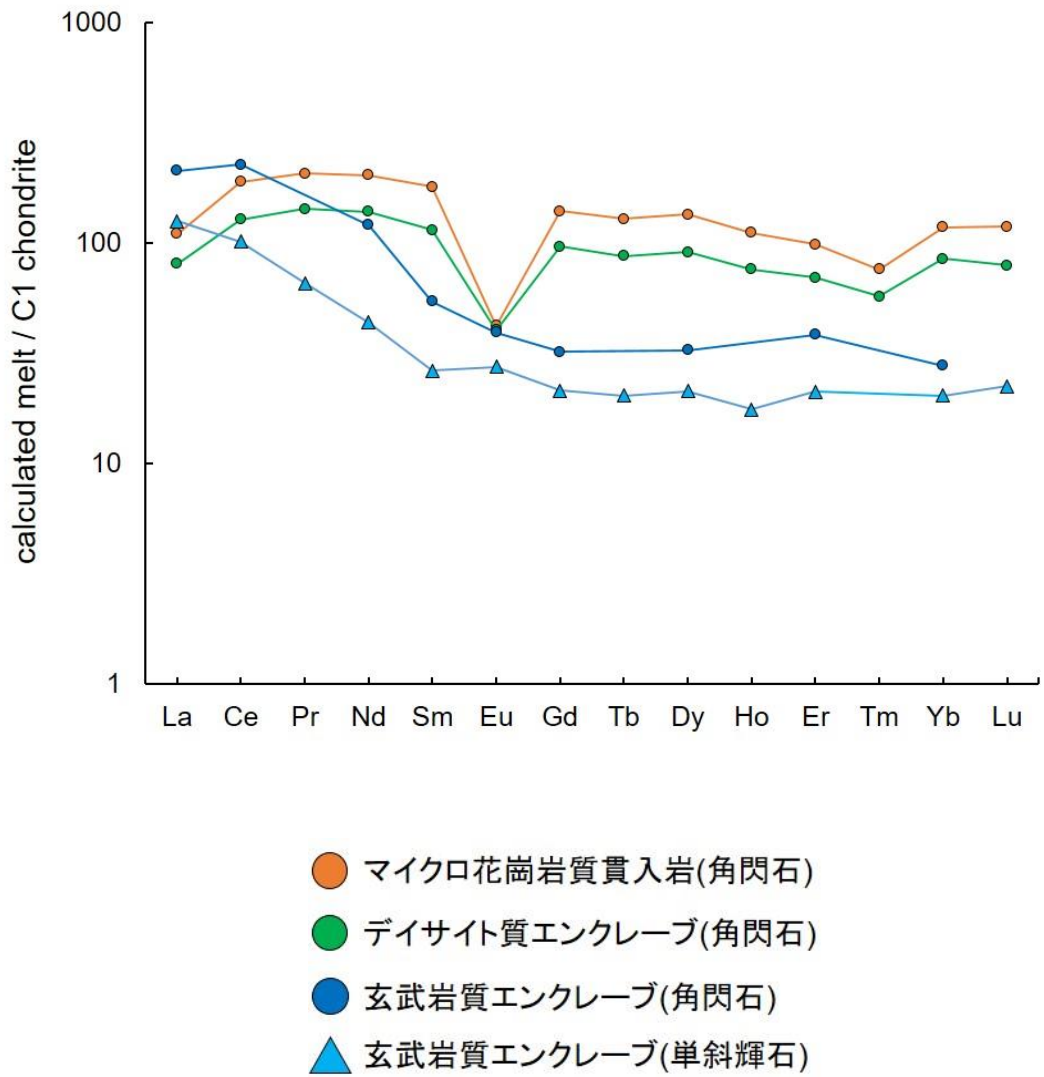


図 35 荒川地域の貫入岩及びエンクレーブに含まれる角閃石及び単斜輝石の平均希土類元素含有量から分配係数を用いて算出したメルトの希土類元素パターン

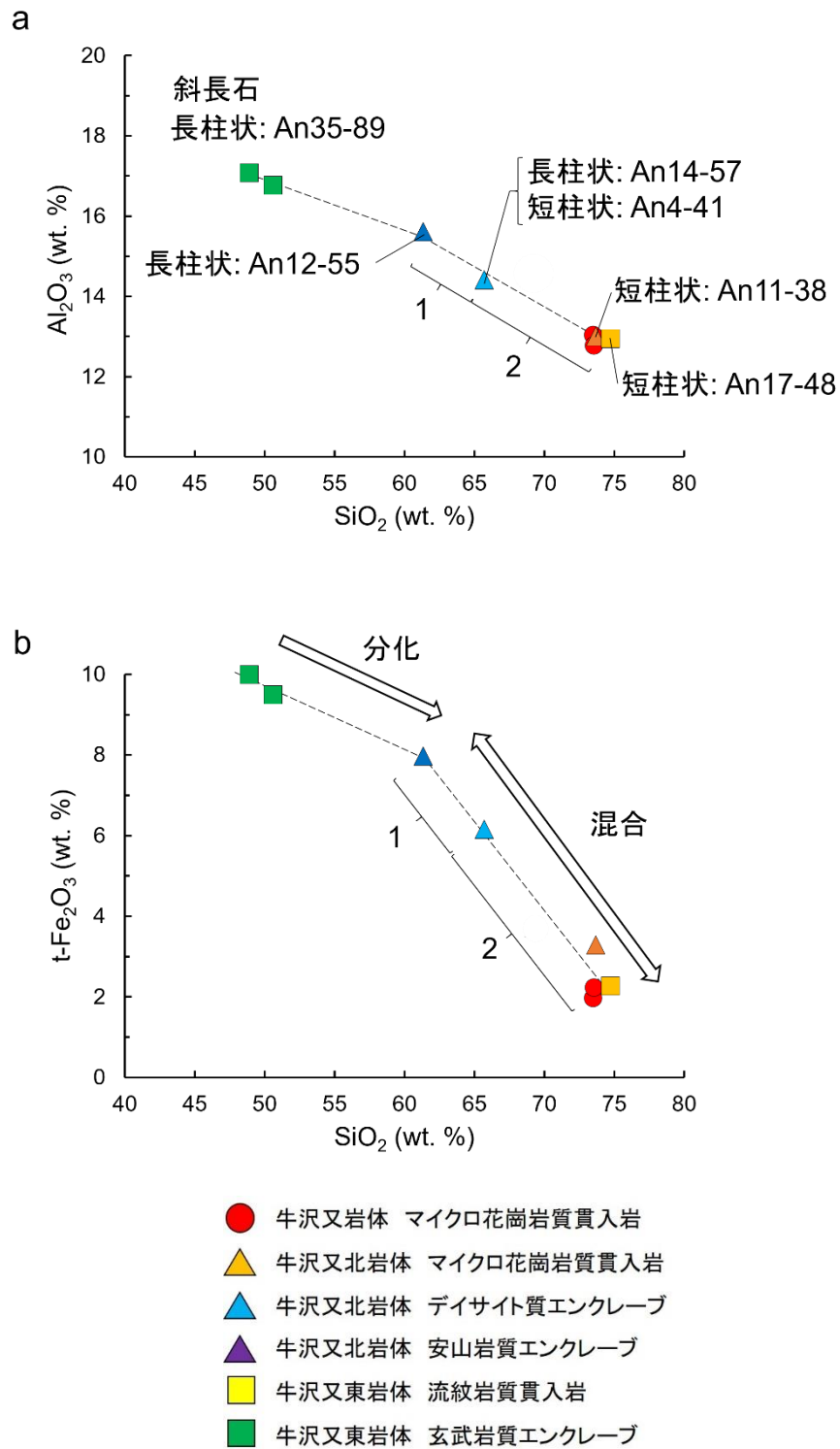


図 36 a. 岩石試料の全岩 SiO_2 vs. Al_2O_3 図. b. 同 SiO_2 vs. $t-Fe_2O_3$ 図

それぞれの岩石試料に含まれる斜長石の形状と An 値を示す。安山岩質エンクレーブ、デイサイト質エンクレーブ、珪長質貫入岩の組成比を示す。

8.3. メルトの銅・硫黄含有量及び放出量の推定

主たる鉱床濃集元素である銅と硫黄が岩石として固結する前のメルト中にどの程度含有されていたかを明らかにするために、斜長石及び角閃石の銅含有量と燐灰石中の硫黄含有量、実験的に得られている鉱物-メルト間の分配係数を用いて、メルトの銅及び硫黄含有量の推定を行った。マグマ固結時における不適合元素の濃集や、脱ガスによる半揮発性元素の分離によるメルト組成変化の影響を最小限にするため、早期晶出相である高い An 値を示す斜長石 3~5 点の平均 Cu 含有量を計算に用いた。また、斜長石に遅れて晶出している角閃石については、連続的な Cu 含有量変化を示すため、最大値と最小値を用いた。分配係数は合成実験によるランプロダクトを LA-ICP-MS によって局所分析することで得られた値(Liu et al., 2014, 2015; Iveson et al., 2018)を用いた。また、デイサイト質エンクレーブを形成したマグマについては、安山岩質マグマ(分化した玄武岩質マグマ)と流紋岩質マグマは 2:1 の混合比で混合することで形成されたことが示唆されることから、推定した両メルトの Cu 含有量を 2:1 の比率で平均化することで Cu 含有量の算出を行った。

計算の結果、斜長石の分析値に基づくメルト中の Cu 含有量は、玄武岩質エンクレーブを形成したマグマで 144.9 ± 47.6 ppm, 安山岩質エンクレーブを形成したマグマで 18.8 ± 6.4 ppm, デイサイト質エンクレーブを形成したマグマで 59.0 ± 6.6 ppm, マイクロ花崗岩質貫入岩を形成したマグマで 21.3 ± 2.8 ppm と計算された(図 37)。鉱物-メルト間の分配係数を用いて算出したメルト中と全岩の Cu 含有量の差分を求め、マグマ固結時にメルト-流体間でどのように分配されたのか検討を行った。玄武岩質エンクレーブ、安山岩質エンクレーブ、デイサイト質エンクレーブ、マイクロ花崗岩

質貫入岩における平均推定メルトと全岩のCu含有量の最低差分は、それぞれ0.0 ppm, 9.0 ppm, 50.4 ppm, 17.5 ppm となった(図 37). この値はマグマの単位質量あたりのCu放出量に相当する. 半揮発性元素であるCuの最低差分は、玄武岩質エンクレーブ以外の3試料において推定メルトと全岩の差分は正の値を示す. このことは、デイサイト質エンクレーブを形成したデイサイト質マグマ及びマイクロ花崗岩を形成した流紋岩質マグマの固結時に分離した流体と共に銅が分離したことを示唆する. このことは、銅が高いメルト-流体間の分配係数(共存するメルト包有物と流体包有物の元素組成から得られた値; Audétat and Edmonds, 2020)を示すことと調和的である. また、玄武岩質エンクレーブにおいて推定メルト及び全岩の銅含有量の最低差分が小さい値であることは、玄武岩質エンクレーブの固結時に銅の移動を伴う流体の分離が発生しなかった、または極めて小さかったことを示唆する(図 37). 特に、玄武岩質エンクレーブは外縁部に珪質な反応縁が見られ、固結時に揮発成分の散逸が発生しなかったと推測される. 銅が斑銅鉱及び黄銅鉱として岩石中に固定されていることや、結晶粒間に熱水変質を伴わない結晶度の高い自生緑泥石を含むことと調和的である. このことは、銅及び硫黄、水に富む玄武岩質マグマが流紋岩質マグマだまりに注入した際に、両者の温度差が大きいためマグマ混合を生じずにエンクレーブとして固化し、急冷及びメルトの組成差に基づく緻密な外縁部の発達によって閉鎖系環境で結晶化した場合には、銅及び硫黄、水は硫化鉱物及び含水鉱物として固定され、鉱床形成への寄与は小さいことを示唆する.

玄武岩質エンクレーブ、安山岩質エンクレーブ、デイサイト質エンクレーブ、マイクロ花崗岩質貫入岩における推定メルトと全岩の銅含有量の最低差分(最低放出量)を推定メルトの最低銅含有量で割った銅放出率は、それぞれ0%, 73%, 96%, 95%

である。したがって、銅放出量と放出率の双方が優れるデイサイト質マグマが最も効率的に銅を放出したと考えられる。このデイサイト質マグマの推定銅放出量の最低値である 50 ppm という値は、大規模な斑岩型銅鉱床を形成したマグマの銅放出量の値 (20-44 g/t; Chelle-Michou et al., 2017; Chelle-Michou and Chiaradia, 2017 より算出) に匹敵する。

デイサイト質エンクレーブ中の後期晶出角閃石の銅含有量と Iveson et al. (2018) による分配係数に基づく計算では、角閃石と平衡であったメルトの銅含有量は 9-24 ppm と計算された。特に、斜長石の一部を除いて銅を 9 ppm 以上含有する鉱物が認められないことと、石英の銅含有量が僅少であると仮定すると、角閃石晶出時の系全体では、9-24 ppm より小さい値となる可能性が高い。後期晶出角閃石と平衡であったメルトや斑晶及びメルトからなる系全体の銅含有量が、斜長石の銅含有量と分配係数から計算された銅含有量よりも小さいことは、メルトの結晶化が進行する過程において、一定量が結晶化するとメルトから流体が分離し、多量の銅が流体に分配されてメルトから取り除かれることを示す研究結果 (Cline, 1995; Chelle-Michou et al., 2017) と調和的である (図 38)。

Chelle-Michou and Chiaradia (2017) による推定では、斑岩-スカルン銅鉱床に濃集する銅及び硫黄の量と単位体積当たりのマグマが放出する銅及び硫黄の量を対比すると、銅よりも硫黄の放出量によって鉱床形成に必要なマグマの最低量が規制されている。そのため、荒川鉱床形成に関連したマグマ系において相対的に高い銅放出率・銅放出量を示すと計算されたデイサイト質マグマと流紋岩質マグマに含まれる燐灰石の硫黄含有量から、Parat et al. (2011) 及び Peng et al. (1997) による燐灰石-メルト間の分配係数を用いてメルト中の硫黄含有量を計算した。温度に依存する分配係数を示し

た Peng et al. (1997)の分配係数では、晶出順序及び角閃石温度計によって得られた温度から、両者共に 800 °Cにおける分配係数を使用した。それぞれの分配係数によって計算されたメルト中の硫黄含有量は、デイサイト質マグマで概ね 0-120 ppm と 0-140 ppm の値を示し、流紋岩質マグマで概ね 0-60 ppm と 0-80 ppm の値を示した(図 39)。両者ともにマグマ結晶化の後期に連続的な含有量変化を示すことは、マグマの段階的な脱ガスを示唆する。メルトと全岩の硫黄含有量の差分はデイサイト質マグマで約 100 ppm、流紋岩質マグマで約 40 ppm である。これらの値は、単位体積当たりの硫黄放出量に相当する。銅と同様の計算で求めたデイサイト質マグマと流紋岩質マグマの硫黄放出率は、約 83 %及び約 67 %である。このことは、SO₂はメルトへの溶解度が低く (Burnham, 1979)、流体としてマグマから放出されることと概ね調和的である。

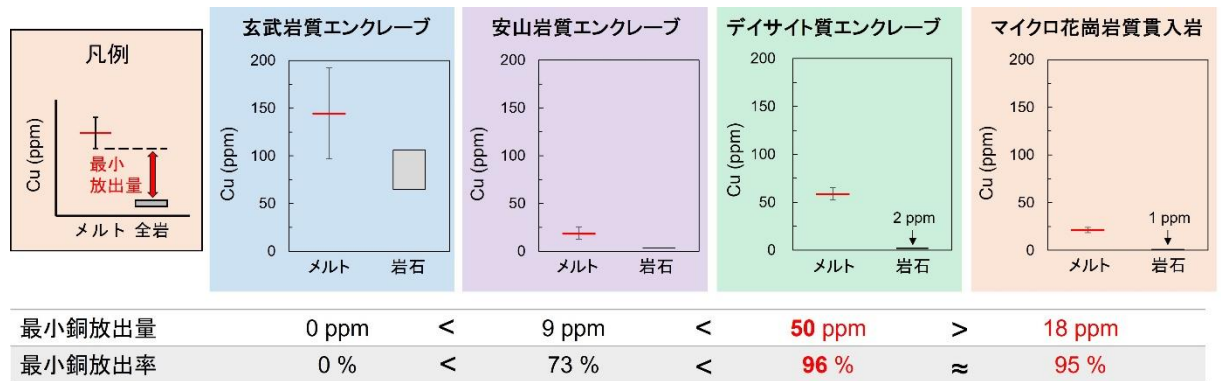


図 37 マイクロ花崗岩質貫入岩及びデイサイト質エンクレーブ，安山岩質エンクレーブ，玄武岩質エンクレーブにおける推定メルトと全岩の Cu 含有量の最小差分及び最小 Cu 放出率

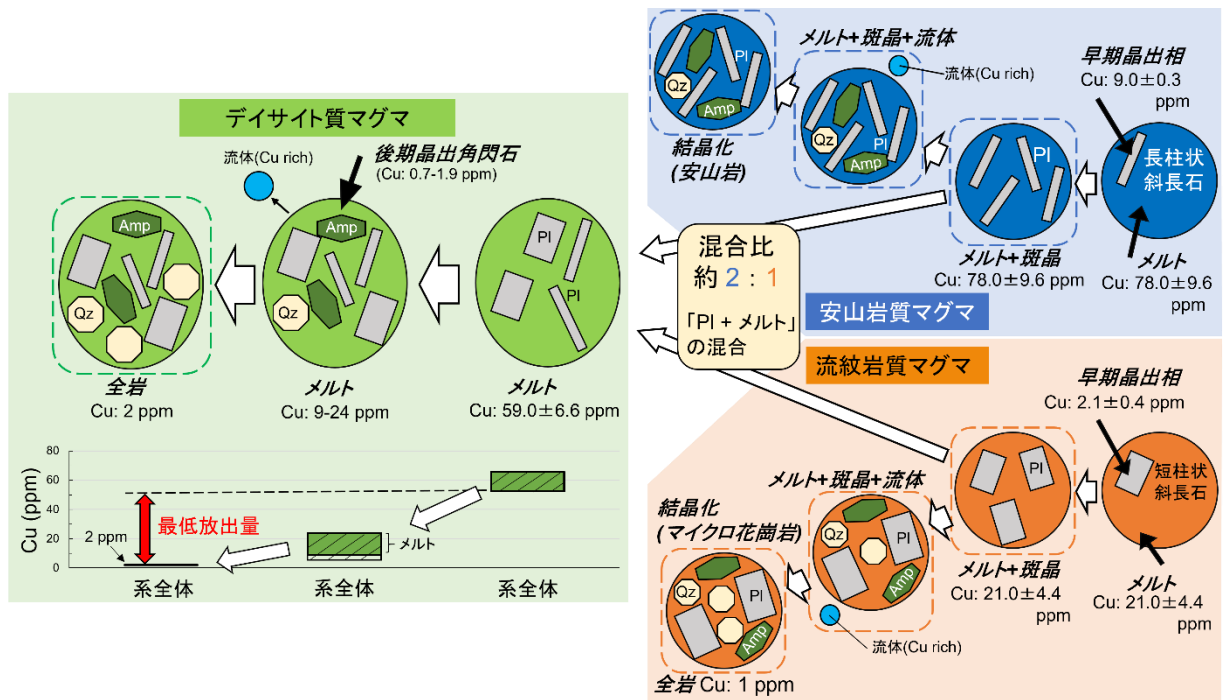


図 38 マグマの混合及び混合後の結晶化過程における Cu の移動及び分離機構の概念図

Cu に富む分化した玄武岩質マグマと Cu に乏しい流紋岩質マグマが混合して形成されたデイサイト質マグマが結晶化する過程で段階的に Cu がメルトから分離したことが示唆される。また、結晶化過程後期のデイサイト質マグマは、後期晶出角閃石と平衡なメルトが 9-24 ppm の Cu 含有量を示す。角閃石及び長柱状斜長石の一部以外は 9 ppm より低い銅含有量を示すほか、石英の Cu 含有量は極めて低い値であると仮定すると、メルト及び結晶から構成される系全体の銅含有量は 9 ppm を下回る可能性もある。

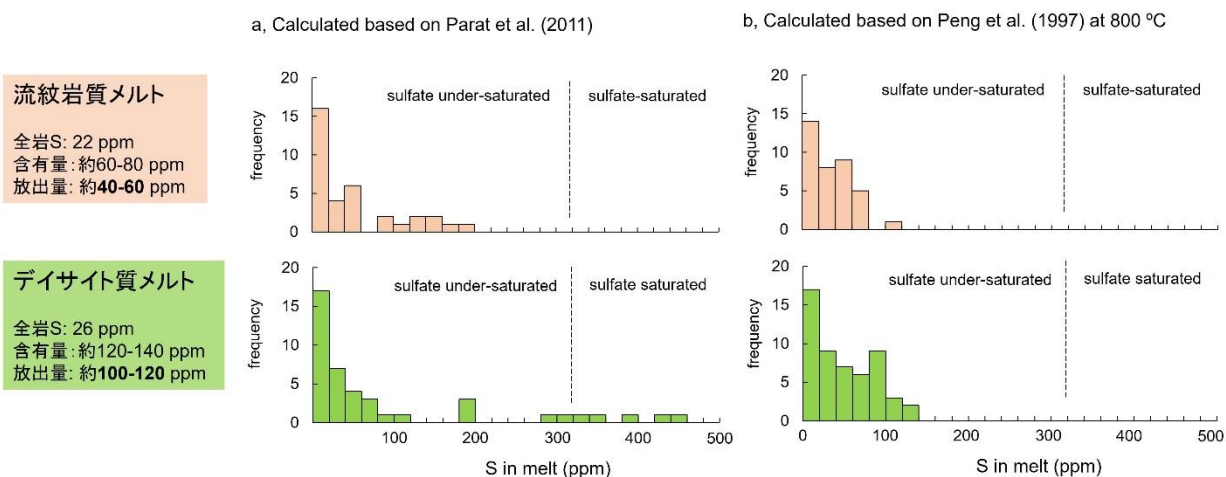


図 39 マイクロ花崗岩質貫入岩及びデイサイト質エンクレーブに含まれる燐灰石の S 含有量から算出したメルトの S 含有量

a. Parat et al. (2011)による分配係数を使用して算出されたメルトの S 含有量. デイサイト質メルトについては, グラフの範囲外に 5つのデータが存在する. また, 分配係数の有効範囲外データ 5点は表示されていない. b. Peng et al. (1997)による分配係数を使用して算出されたメルトの S 含有量. 角閃石温度計によって得られた 800 °Cを晶出温度として計算を行った. 図中の破線は Parat et al. (2011)による硫黄酸化物が飽和し, マグマ性硫酸塩鉱物が晶出しうる硫黄濃度を示す.

8.4. 鉱床形成に必要なマグマ規模の推定

推定したマグマの銅放出量が、マスバランス的に妥当かどうかを検討するために、荒川鉱床群の形成に必要なマグマの体積を求めた。荒川鉱床群の埋蔵総銅量は約 200,000 t である(日本鉱業協会(1968)より算出)。また、銅と硫黄を最も効率的に放出したデイサイト質マグマの比重を 2.5 t/m^3 、銅放出量を 50 ppm とすると、荒川鉱床群の総銅量は最低約 1.6 km^3 のデイサイト質マグマで形成可能であると見積もられる。このことは、巨大なマグマ-熱水性銅鉱床の形成には、巨大なマグマだまりの形成が重要であるとする Chelle-Michou et al. (2017)の指摘と調和的であり、世界的には小規模な鉱床規模の荒川鉱床群は比較的小さいマグマだまりから形成されたことが示唆される。

荒川鉱床群に濃集した推定総銅量は約 200,000 t であるが、銅の鉱石鉱物は黄銅鉱のみであるため、黄銅鉱に換算すると約 578,000 t となる。そのうち硫黄の含有量は、約 201,800 t である。さらに、硫黄を固定する鉱物として鉱床に産する黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱及び熱水変質鉱物として産する黄鉄鉱が挙げられる。これらの硫化鉱物の存在量は定量的に明らかではないため、斑岩型銅鉱床における硫黄含有鉱物の量比を参考に荒川鉱床群における硫黄の総量を算出した。アメリカ合衆国ユタ州のビンガムキャニオン鉱床では、黄銅鉱以外に含有される硫黄の総量と黄銅鉱に含有される硫黄の総量の比は、約 9.8 とされている(Hattori and Keith, 2001 より算出)。また同様に、ペルー共和国 Corocohuayco 鉱床では、約 5.6 とされている(Chelle-Michou and Chiaradia, 2017 より算出)。これらの値に基づき、硫黄の量を黄銅鉱に含まれる硫黄量とその 10 倍の値を合算した約 2,200,000 t と仮定して計算を行った。計算の結果、熱水系が濃集

した総硫黄量を供給するために必要なマグマの量は約 8.8 km^3 となった。したがって、約 9 km^3 のデイサイト質マグマによって荒川鉬床群が形成可能であると考えられる。したがって、本研究で得られた銅及び硫黄の放出量の推定値は地質学的に現実的な数値であると言える。特に、荒川鉬床群の中央部付近には直径 3 km 程度の低重力異常帯の分布が報告されており、珪長質な深成岩体が伏在する可能性が指摘されていることと調和的である(通商産業省資源エネルギー庁, 1986)。

9. 結論

Satori et al. (2022)による先行研究によって、新生代東北日本弧に多数分布する鉍脈型銅鉍床と時間的・空間的な関連を有し、銅鉍床を形成したマグマの浅所貫入相であることが明らかにされた荒川地域の珪長質貫入岩は、マイクロ花崗岩及び斜長流紋岩からなる。これらの珪長質岩を形成したマグマはウェッジマントル由来の典型的な島弧の流紋岩質マグマであり、硫化物-硫黄酸化物(SSO)緩衝曲線よりも高い酸素分圧で形成された酸化的なマグマである。このマグマには玄武岩質-デイサイト質なマグマが注入し、マグマ性エンクレーブとして現在の地表に現れている(図 40)。

苦鉄質マグマはウェッジマントル由来の典型的な島弧の玄武岩であり、水に富む。流紋岩質マグマへの注入時に相対的に急冷されることで、エンクレーブとしての閉鎖的な環境下で結晶化した。結晶化の過程において SO_2 を酸化剤とする自己酸化還元反応によって、マグマ性銅硫化鉍物として銅及び硫黄が固定された。このことは、銅及び硫黄、水に富む玄武岩質マグマが流紋岩質マグマだまりに注入した場合において、マグマ混合が発生せず、エンクレーブとして固結することで、鉍床濃集元素たる銅及び硫黄は岩石中に固定されてしまい、鉍化流体への移動は難しいことを示唆する。一方、玄武岩質マグマが分化して形成された安山岩質マグマは流紋岩質マグマと約 2:1 の混合比で混合し、デイサイト質なマグマを形成した。このマグマは SSO 緩衝曲線よりも高い酸素分圧であり、銅及び硫黄をマグマ性硫化物として固定せず、効率的に熱水系へ放出することが可能な酸化状態を示す。銅及び硫黄はマグマ固結時にマグマ性硫化鉍物として固定されず、結晶化の進行に伴って分離した流体と共にメルトから分離したことで鉍化流体及び銅鉍床を形成したと考えられる(図 41)。しかし、酸化的な

環境であるものの、メルト中の硫黄含有量は硫酸塩鉱物の晶出に必要な飽和量よりも低い値であった。銅の放出量及び放出率の観点からこのデイサイト質マグマが主たる銅の放出源であり、放出された銅の量は最低 50 ppm と見積もられた(図 37 及び 41)。この値は主要な斑岩型銅鉱床を形成したマグマの推定銅放出量の値(Chelle-Michou et al., 2017; Chelle-Michou and Chiaradia, 2017 から算出)と同等である。また、この値はマグマに含まれる推定された銅量の約 96%が放出されたことを示す。したがって、荒川鉱床群の総銅量を 200,000 t (日本鉱業協会(1986)より算出)とした場合に、鉱床形成に必要なデイサイト質マグマの最低量は約 1.6 km³ と見積もられた。また、このデイサイト質マグマの硫黄放出量は約 100 ppm と算出され、荒川鉱床群及び熱水系に濃集した硫黄の量を銅 200,000 t に相当する黄銅鉱に含まれる硫黄量とその 10 倍量の合計である 2,200,000 t と仮定した場合に最低限必要なデイサイト質マグマは約 8.8 km³ と見積もられた。この値は非現実的に膨大もしくは僅少な値ではない。以上のことから、デイサイト質マグマを主要な供給源として、放出された銅や硫黄が地下浅所で濃集し、銅鉱床を形成したことが示唆された。

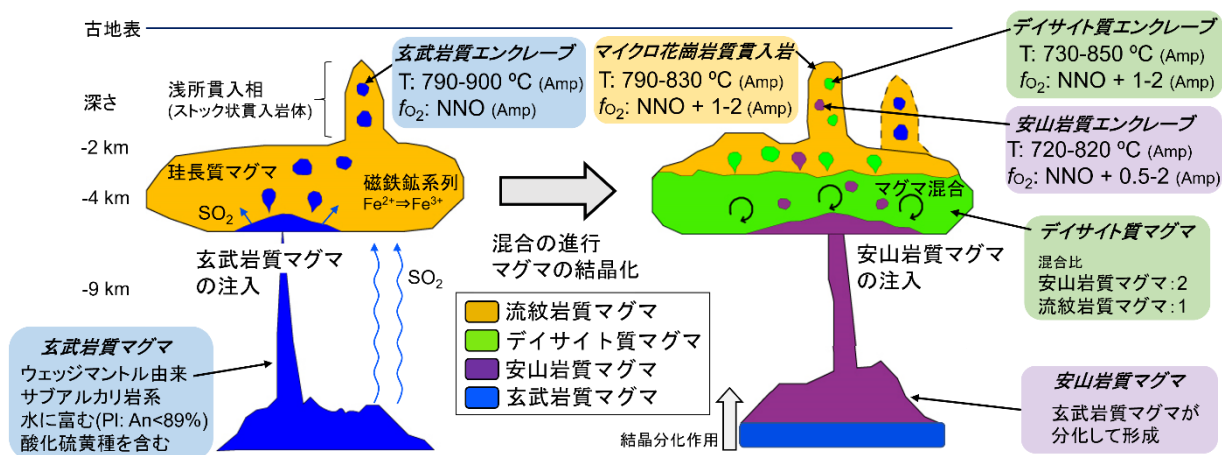


図 40 荒川銅鉱床を形成したマグマ系の形成過程及び物理化学条件総括図

マグマ系の形成初期には水に富むサブアルカリ岩系の玄武岩質マグマが地下 2~5 km 程度に位置する流紋岩質マグマだまりに注入した。この流紋岩質マグマはサブアルカリ岩系に分類される磁鉄鉱系列のマグマであり、水に富む。マグマ混合が十分に発生しなかったために、玄武岩質マグマは、エンクレーブとして固結した。マグマ系の形成後期には安山岩質マグマ(分化した玄武岩質マグマ)が流紋岩質マグマだまりに注入し、2:1 の比率でマグマ混合が生じたことで酸化的なデイサイト質マグマを形成した。安山岩質マグマとデイサイト質マグマの一部は、流紋岩質マグマに注入し、安山岩質エンクレーブやデイサイト質エンクレーブとして地表に現れている。

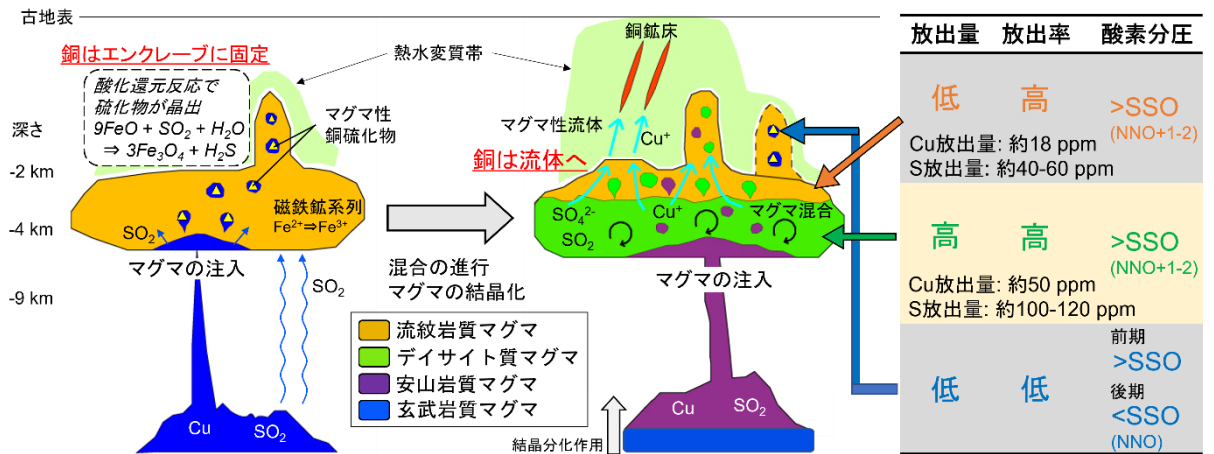


図 41 荒川銅鉱床を形成したマグマプロセスの概念図

マグマ系の形成初期には銅及び硫黄に富む玄武岩質マグマが流紋岩質マグマに注入したものの、マグマ混合が十分に発生しなかったために、玄武岩質マグマは、エンクレーブとして固結し、銅及び硫黄はマグマ性硫化鉱物としてエンクレーブ中に固定され、流紋岩質マグマ及び熱水系に供給されなかったことが示唆される。マグマ系の形成後期には安山岩質マグマ(分化した玄武岩質マグマ)が流紋岩質マグマだまりに注入し、マグマ混合が生じたことでデイサイト質マグマを形成した。このマグマはSSO緩衝曲線よりも酸化的な環境であり、銅と硫黄はマグマが結晶化する際にマグマ性硫化鉱物として固定されず、流体と共に放出され、銅鉱床を形成したことが示唆される。このデイサイト質マグマや安山岩質マグマの一部は流紋岩質マグマに注入し、エンクレーブとして地表に現れている。

謝辞

本研究に当たり、鉱物資源・テクトニクス研究室の渡辺寧教授と越後拓也博士には野外調査、室内実験、議論などで御指導を賜った。同研究室の西川治博士には試料調整や地史の検討で御指導を賜った。また、青木翔吾博士には議論や論文のとりまとめにおいて御指導頂いた。産業技術総合研究所地質調査総合センターの昆慶明博士には LA-ICP-MS による鉱物元素分析や議論において懇切丁寧な御指導を賜った。また、星野美保子博士には EPMA による鉱物元素分析を御指導頂いた。地質調査総合センターにおける分析等の研究活動の実施については、産総研リサーチアシスタント制度及び技術研修員制度の御支援を頂いた。国際資源学研究科の石山大三教授と大場司教授には、本研究のとりまとめに際して有益な御助言を頂いた。元国際資源学教育研究センターの緒方武幸博士には SEM-EDS や EPMA による分析実験において御指導を賜ったほか、全岩元素組成の委託分析でお世話になった。国際資源学研究科の鈴木照洋氏と秋田浩希氏には野外調査にご協力頂いた。御指導・御助言を頂いた皆様に厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 秋田県(1968) 秋田県鉱山誌, 1-140.
- Audétat, A. and Edmonds, M. (2020) Magmatic-hydrothermal fluids. *Elements*, 16, 401-406.
- Bédard, J. H. (2006) Trace element partitioning in plagioclase feldspar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 3717-3742.
- Bennett, E. N., Lissenberg, C. J. and Cashman, K. V. (2019) The significance of plagioclase textures in mid-ocean ridge basalt (Gakkel Ridge, Arctic Ocean). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174, Article number: 49, 1-22.
- Blundy, J., Mavrogenes, J., Tattitch, B., Sparks, S. and Glimer, A. (2015) Generation of porphyry copper deposits by gas-brine reaction in volcanic arcs. *Nature Geoscience*, 8, 235-240.
- Boynnton, W. V. (1984) *Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies*. Elsevier, New York, 63-114.
- Burnham, C. (1979) *Magmas and hydrothermal fluids*. H. L. Barnes (ed.), *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (2nd ed.), J. Wiley and Sons, New York, 71-136.
- Cao, M., Evans, N. J., Hollings, P., Cooke, D. R., McInnes, B. I. A., Qin, K. and Li, K. (2018) Phenocryst zonation in porphyry-related rocks of the Baguio district, Philippines: evidence for magmatic and metallogenic processes. *Journal of Petrology*, 5, 825-848.
- Chambefort, I., Dilles, J. II. and Kent, A. J. R. (2008) Anhydrite-bearing andesite and dacite as a source for sulfur in magmatic-hydrothermal mineral deposits. *Geology*, 36, 719-722.
- Chappel, B. W. and White, A. J. R. (1974) Two contrasting granite types, *Pacific geology*, 8, 173-174.
- Chelle-Michou, C., Bertrand, R., Luca, C. and Guy, S. (2017) Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits. *Scientific Reports*, 7, 1-12.
- Chelle-Michou, C. and Chiaradia, M. (2017) Amphibole and apatite insights into the evolution and mass balance of Cl and S in magmas associated with porphyry copper deposits. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 172:105, 1-26.
- 千谷好之助(1930) 秋田北部油田の地質に就きて. *地質学雑誌*, 37, 732-739.
- Cline, J. S. (1995) Genesis of porphyry copper deposits: the behavior of water, chloride, and copper in crystallizing melts. *Porphyry copper deposits of the American Cordillera*, *In*

- Pierce, F. W. and Bolm, J. G. (eds.), *Arizona Geology Digest*, 20, 69-82.
- Collins, S. J., Pyle, D. M. and Macleman, J. (2009) Melt inclusions track pre-eruption storage and dehydration of magmas at Etna. *Geology*, 6, 571-574.
- Dilles, J. H., Kent, A. J. R., Wooden, J. L., Tosdal, R. M., Kolezar, A., Lee, R. G. and Farmer, L. P. (2015) Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Scientific Communications*, 110, 241-251.
- Fujimaki, H. and Kurasawa, H. (1980) Lateral variation of REE pattern of basaltic magma across the Japan Arc. *The Journal of the Japanese Association of Mineralogists, Petrologists and Economic Geologists*, 75, 313-322.
- 藤本幸雄(2006) 秋田県太平山複合花崗岩質岩体の岩石学的研究, *岩石鉱物科学*, 35, 253-269.
- 藤縄明彦(1991) 東北日本, 安達太良火山におけるソレアイト, *カルクアルカリマグマ系列: その進化メカニズムと成因関係*. *火山*, 36, 241-254.
- Galer, S. J. G. and O’Nions, R. K. (1985) Residence of thorium, uranium and lead in the mantle with implications for mantle convection. *Nature*, 316, 778-782.
- 雁沢好博(1983) フィッション・トラック法によるグリーン・タフ変動の年代区分, その2-富山県太美山地域-. *地質学雑誌*, 89, 271-286.
- Hamada, M. and Fujii, T (2007) H₂O-rich island arc low-K tholeiite magma inferred from Ca-rich plagioclase-melt inclusion equilibria. *Geochemical Journal*, 41, 437-461.
- Hattori, K. H. and Keith, J. D. (2001) Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham deposit, Utah. *Mineralium Deposita*, 36, 799-806.
- Hawthorne, F. C., Oberti, R., Harlow, G. E., Maresch, W. V., Martin, R. F., Schumacher, J. C. and Welch, M. D. (2012) IMA Report Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist*, 97, 2031-2048.
- 早坂康隆・大友幸子・西川 治(2015) 東北脊梁山地に点在する白亜紀花崗岩類のジルコン U-Pb 年代. *日本地質学会第 122 回学術大会講演要旨*, R1-P-1.
- Hedenquist, J. W. and Lowenstern, J. B. (1994) The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, 370, 519-527.

- Hine, R., Williams, I. S., Chappell, B. W. and White, A. J. R. (1978) Contrasts between I- and S-type granitoids of the Kosciusko batholith. *Journal of the Geological Society of Australia*, 25, 219-234.
- Hirata, T. and Kon, Y. (2008) Evaluation of the analytical capability of NIR femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Science*, 24, 345-353.
- Houston, R. A., and Dilles, J. H. (2013) Structural geologic evolution of the Butte district, Montana. *Economic Geology*, 108, 1397-1424.
- Huzioka, K. (1964) The Aniai flora of Akita Prefecture, and the Aniai-type floras in Honshu, Japan. *Journal of Mining College, Akita University, Series A*, 3, 1-105.
- 井上 武(1960) 秋田油田地域における含油第三系およびその基盤グリーン・タフの火成層序学的研究. 秋田大学鉱山学部地下資源開発研究所報告, 1-79.
- 井上 武・藤岡一男・高安泰助(1956) 秋田油田における荷背凝灰岩の検討. 石油技術協会誌, 21, 79-84.
- Ishihara, S. (1981) The granitoid series and mineralization. *Economic Geology, 75th Anniversary Volume*, 458-484.
- Iveson, A. A., Rowe, M. C., Webster, J. D. and Neill, O. K. (2018) Amphibole-, clinopyroxene-, and plagioclase-melt partitioning of trace and economic metals in halogen-bearing rhyodacitic melts. *Journal of Petrology*, 59, 1579-1604.
- Jugo, P. J., Luth, R. W. and Richards, J. P. (2015) Experimental data on the speciation of sulfur as a function of oxygen fugacity in basaltic melts. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 69, 497-503.
- Kano, H. (1964) The geology and structure of the Taiheizan complex pluton with special reference to the basement problem of the Green tuff region. *Journal of Mining College, Akita University, Series A, Vol. III*, 107-117.
- 加納 博・矢内桂三・辻万亀雄・河瀬章貴・蟹沢聡史(1966) グリーン・タフ地域における2・3の基盤花崗岩の構造とその意義. 地団研専報, 12, 1-15.
- 河野義礼・植田良夫(1966) 本邦産火成岩の K-A dating (IV)－東北日本の花崗岩類－.

岩石鉱物鉱床学会誌, 56, 41-55.

木村勝弘(1986) 秋田県地域の K-Ar 年代層位. 日本地質学会第 92 年学術大会講演要旨, 132.

Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G. (1997) Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names. *Mineralogical Magazine*, 61, 295-321.

Leake, E. B. (1978) Nomenclature of amphiboles. *American Mineralogist*, 63, 1023-1052.

Le Maitre R. W., Bateman P., Dudek A., Keller J., Lameyre Streckeisen A., Woolly A. R. and Zanettin B. (1989) A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell, Oxford.

Liu, X., Xiong, X., Audétat, A., Li, Y., Song, M., Li, Li., Sun, W. and Ding, X. (2014) Partitioning of copper between olivine, orthopyroxene, clinopyroxene, spinel, garnet and silicate melts at upper mantle conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 118, 247-262.

Liu, Y. and Comodi, P. (1993) Some aspects of the crystal-chemistry of apatites. *Mineralogical Magazine*, 57, 709-720.

Mangham, D. T., Keith, J. D., Christiansen, E. H., Pulsipher, T., Hattori, K. and Evans, N. J. (2002) Contributions from mafic alkaline magmas to the Bingham porphyry Cu-Au-Mo deposit, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 37, 14-37.

Miyashiro, A. (1975) Classification, characteristics and origin of ophiolites.

Moore, G., Vennemann, T. and Carmichael, I. S. E. (1998) An empirical model for the solubility of H₂O in magmas to 3 kilobars. *American Mineralogist*, 83, 36-42.

Mungall, J. E. (2002) Roasting the mantle: slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30, 915-918.

日本鉱業協会(1968) 日本の鉱床総覧(下巻), 256-263.

大沢 穰・加納 博・丸山孝彦・土谷信之・伊藤雅之・平山次郎・品田正一(1981) 太

平山地域の地質. 地質調査所, 1-65.

- Parat, F., Holtz, F. and Streck, M. J. (2011) Sulfur-bearing magmatic accessory minerals. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 73, 285-314.
- Peng, G., Luhr, J. F. and McGee, J. J. (1997) Factors controlling sulfur concentrations in volcanic apatite. *American Mineralogist*, 82, 1210-1224.
- Picher W. S. (1997) *The Nature and Origin of Granite* (2nd ed.). Chapman & Hall, London, 1-387.
- Richards, J. P. (2007) Special Paper: Adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 102, 537-538.
- Richards, J. P. (2015) The oxidation state, and sulfur and Cu contents of arc magmas: implications for metallogeny. *Lithos*, 233, 27-45.
- Ridolfi, F. and Renzulli, A. (2012) Calcic amphiboles in calc-alkaline and alkaline magmas: thermobarometric and chemometric empirical equations valid up to 1,130 °C and 2.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163, 877-895.
- Saito, G., Stimac, J. A., Kawanabe, Y. and Goff, F. (2002) Mafic-felsic magma interaction at Satsuma-Iwojima volcano, Japan: Evidence from mafic inclusions in rhyolites. *Earth Planets and Space*, 54, 303-325.
- Sasaki, A. and Ishihara, S. (1979) Sulfur isotopic composition of the magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Japan. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68, 107-115.
- Sasaki, A. and Ishihara, S. (1980) Sulfur isotope characteristics of granitoids and related mineral deposits in Japan. *Proceedings of the 5th Quadrennial IAGOD Symposium*, 325-335, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Satori, S., Ogata, T. and Watanabe, Y. (2018) Bismuth and tellurium minerals from the Arakawa deposit in the Northeast Japan arc. *International Journal of the Society of Materials Engineering for Resources*, 23, 178-183.
- Satori, S., Watanabe, Y., Ogata, T. and Hayasaka, Y. (2022) Late Miocene magmatic-hydrothermal system and related vein-type copper mineralization of the Arakawa area, Akita, Japan. *Resource Geology*.
- Saunders, A. D. and Tarney, J. (1984) Geochemical characteristics of basaltic volcanism within back-arc basins. *Geological Society of London Publications*, 16, 59-76.
- Streck, M. J., and Dilles, J. H. (1998) Sulfur content of oxidized arc magmas as recorded in

- apatite from a porphyry copper batholith. *Geology*, 26, 523-526.
- Sun S. S. (1980) Lead isotopic study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island arcs. *Philosophical Transactions A*, 297, 409-445.
- Takagi, T. and Tsukimura, K. (1997) Genesis of oxidized- and reduced type granites. *Economic Geology*, 92, 81-86.
- Tepper, J. H. and Kuehner, S. M. (1999) Complex zoning in apatite from the Idaho batholith: a record of magma mixing and intracrystalline trace element diffusion. *American Mineralogist*, 84, 581-595.
- Togashi, S., Tanaka, T, Yoshida, T, Ishikawa, K, Fujinawa, A. and Kurasawa, H. (1992) Trace elements and Nd-Sr isotopes of island arc tholeiites from frontal arc of Northeast Japan. *Geochemical Journal*, 26, 261-277.
- 土谷信之・吉川敏之(1994) 刈和野地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 1-72.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1986) 広域調査報告書田沢地域, 1-151.
- 白田雅郎・村山 進・白石建雄・高安泰助・乗富一雄(1979) 秋田県総合地質図幅「刈和野」地域. 秋田県, 1-77.
- Zhang, B., Hu, X., Li, P., Tang, Q. and Zhou, W. (2019) Trace element partitioning between amphibole and hydrous silicate glasses at 0.6-2.6 GPa. *Acta Geochimica*, 38, 414-429.