

愛媛県砥部町における万年安山岩体周辺の地質および熱水変質作用

Geology and hydrothermal alteration of Mannen altered andesite in the Tobe town, Ehime Prefecture, Japan

榊原正幸¹ 千葉悦子¹
近石沙知子² 中井芳恵³

*Masayuki Sakakibara¹, Etsuko Chiba¹,
Sachiko Chikaishi² and Yoshie Nakai³*

¹愛媛大学理学部生物地球圏科学科

Department of Biology and Earth Science, Faculty of
Science, Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama
790-8577, Japan

²国分寺町立国分寺中学校

Kokubunji Junior High School, 1131-1 Niii, Kokubunji-
cho, Ayauta-gun 769-0101, Japan

³佐賀県立唐津西高校

Karatsu-Nishi High School, 1922 Aza-Oyamada,
Machida, Karatsu 847-0821, Japan

Abstract

Geology and hydrothermal alteration of the Mannen altered andesite in Tobe Town, Ehime Prefecture, Japan, has been investigated based on field survey and petrography. The Mannen andesite intrudes into the Sanbagawa metamorphic rocks and the Middle Miocene Kuma group after the formation of breccia including only clasts of the Sanbagawa basic schist.

The Mannen andesite body have undergone extensive hydrothermal alteration and mineralization. The alteration is characterized by the occurrences of quartz, illite, kaolinite, carbonates, chlorite, anaterze, pyrite, arsenopyrite, marcasite, stibnite and chalcopyrite. The texture of sulfide minerals can be divided into five types, sparse, sand, spot, vein and pool, black-ink-drawing types on the basis of the mode of occurrences of sulfide minerals.

Key words: Ehime Prefecture, Tobe Town, hydrothermal alteration, Sanbagawa metamorphic rocks, Kuma Group, Breccia, Mannen altered andesite, sulfide minerals,

はじめに

日本列島の第三紀以前の基盤岩類には、古生代以降の火成活動に伴う熱水変質作用および鉍化作用によって、多種類の重金属元素が濃集している(Ishihara, 1978)。これら重金属類のうち、砒素、鉛、水銀やカドミウムなどは毒性が極めて強く、近年、鉍山のズリや各種土木工事によって排出される有害金属に富む残土(有害残土)が発生している。これら残土およびこれに伴う有害金属を含む酸性流出水が周辺環境悪化の原因となりつつある。ただし、これら天然由来の有害重金属を含む残土は、2003年に施行された「土壌汚染対策法」の対象とはなっていない。そのため、その処理は自治体などによって若干異なっている。

従来、土木工事によって発生する建設残土は、埋め戻し材等として処理されてきた。しかしながら、最近の環境基準の整備などによって、それらは遮断型の廃棄物処分場において厳重に管理されることが必要な場合も出てきている。その場合、発生する有害重金属を含む残土は時として膨大な量となり、かつ同時に発生すると予想される汚染地下水も長期間に亘る浄化が必要となることは十分予想される。しかしながら、これら汚染土砂や地下水の浄化にかかる費用は莫大であり、最終処分場も十分準備されているとはいえない。

さて、筆者ら研究グループ(愛媛大学環境浄化研究グループ)は、土木工事などによって発生した有害金属を含有する土砂・地下水や旧廃止鉍山のズリや酸性鉍山廃水をファイトレメディエーション技術によって環境浄化・修復することを目指し「総合環境科学的研

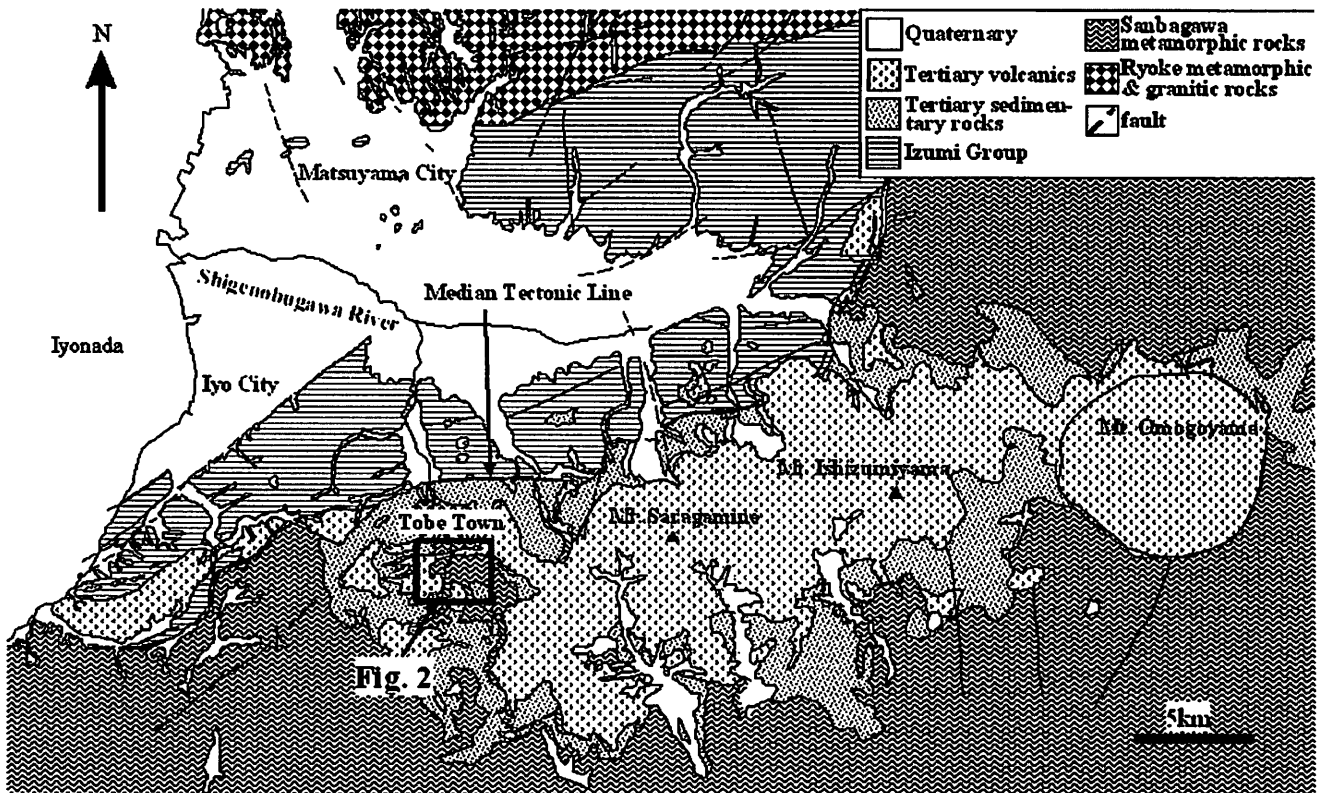


Fig. 1. Geological map of northwestern part of Ehime Prefecture, Japan (adapted from Editing committee geological map of Ehime Prefecture, 1991).

究」を2002年から開始した。ファイトレメディエーションとは、水分や養分を吸収・分解する植物の能力を利用して、土壌や水などの環境を浄化する技術である。これは、他の環境修復技術と比較して、①低コスト、②エネルギー消費0、③環境調和型、という“夢の浄化技術”である。しかしながら、この技術を有害重金属を含む土砂・汚染地下水や鉱山廃水の浄化に使用した事例はなく、実用化への課題は大きい。

特に、土木工事などによって発生する残土が、これらの天然由来の有害重金属を含有する場合、上述のように「土壌汚染対策法」は適用されないが、多くの場合、それらは遮水・埋設されるか、もしくは最終処分場に運び込まれることが多い。それに伴うコストを削減するためには、(1)地下の有害金属の3次元濃度分布の解明、(2)地表付近における化学的風化作用と有害金属の溶脱・再濃集プロセスの解明、(3)肉眼による有害金属濃度の高い岩石の識別、といった課題があげられる。

このような状況を踏まえ、本論文では、愛媛県砥部町万年地区の砒素に富む変質安山岩を、地質調査および岩石薄片の偏光・反射顕微鏡ならびにEDS分析

による岩石・鉱物記載に基づいて、万年変質安山岩体の地史および熱水変質作用を解明することを目的としている。

地質概説

松山平野の南側の山地をほぼ東西に通過する中央構造線を挟んで、その北側には和泉層群が、南側には三波川結晶片岩類が基盤として分布している。伊予市から石鎚スカイライン周辺にかけての地域には、第三系久万層群の二名層・明神層および石鎚層群が、これら和泉層群および三波川結晶片岩類を不整合に覆って分布している。また、それらの分布地域周辺には、石鎚層群と同時期の安山岩類が岩脈として貫入している(田崎ほか, 1990, 1993)(Fig. 1)。

石鎚層群は、下位から高野累層、黒森峠累層、皿ヶ嶺累層および天狗岳累層に区分される。皿ヶ嶺累層は、下位からデイサイト質凝灰岩類、サヌキトイドをふくむ新鮮な斜方輝石安山岩質の溶岩流、およびそれを覆う流紋岩類に区分される。石鎚山系全域に斜方輝石安山岩質の岩脈・岩頸が広く分布するが、特に砥部・久万付近に多い。砥部付近において、サヌキ

トイドは著しく変質した優白質輝石安山岩～黒雲母デイサイトと密接に伴い、後者を貫入あるいは覆って分布する。優白質輝石安山岩～黒雲母デイサイトはサヌキトイドに先行する岩脈～溶岩流で、一般に熱水変質作用を受けており、かなりの部分が陶石化している（須鎗ほか、1986）。

本研究プロジェクトの調査地域は、松山市から南方約20kmに位置する砥部川上流域の砥部町万年地区である（Figs. 1, 2）。この地域には三波川変成岩類および久万層群が分布し（永井・堀越、1953）、これらの岩石中に石鎚層群と同時期の安山岩類が貫入している。三波川変成岩類は主に塩基性片岩および泥質片岩からなり、少量の珪質片岩を伴う。これら基盤岩類に貫入する安山岩類の多くは、ストック状岩脈である。これらのうち大規模な岩体は、石鎚層群の凝灰岩を噴出した火道であると推定される。砥部町から広田村にかけての地域では、これらの基盤岩および久万層群中に様々な規模で岩脈・岩床として貫入した安山岩類が、広域的に熱水変質作用を受けており、それらは砥部陶石として利用されている。陶石鉱床は、外山地区、川登・万年地区および上尾・満穂地区の3つの地区に分けられる。また、この熱水変質作用とほぼ同

時期の鉱化作用によって、アンチモン鉱床および硫化鉄鉱床が形成されている（宮久ほか、1974）。

地 質 各 説

1. 三波川結晶片岩

調査地域の三波川結晶片岩は、その多くが塩基性片岩で少量の珪質片岩の薄層を挟在する。塩基性片岩は緑色～濃緑色を呈し、アルバイト脈が頻繁に見出される。塩基性片岩の片理面の走行・傾斜は千里口から約200 m南ではほぼN60°W30°N、それより南方ではN60°W25°Sで、数100 mオーダーの開いた褶曲が発達している。

調査地域東部の千里口付近において、小規模な安山岩の貫入岩との境界付近で、結晶片岩が角礫化している。また、千里口付近の万年川において、塩基性片岩が幅約50 cm、長さ約10 mにわたって熱水変質作用を受けている。

2. 明神層

調査地域西部では、久万層群明神層が三波川結晶片岩を不整合に覆って分布している（Fig. 2）。明神層は主に円礫岩層からなるが、まれに連続性の悪い礫

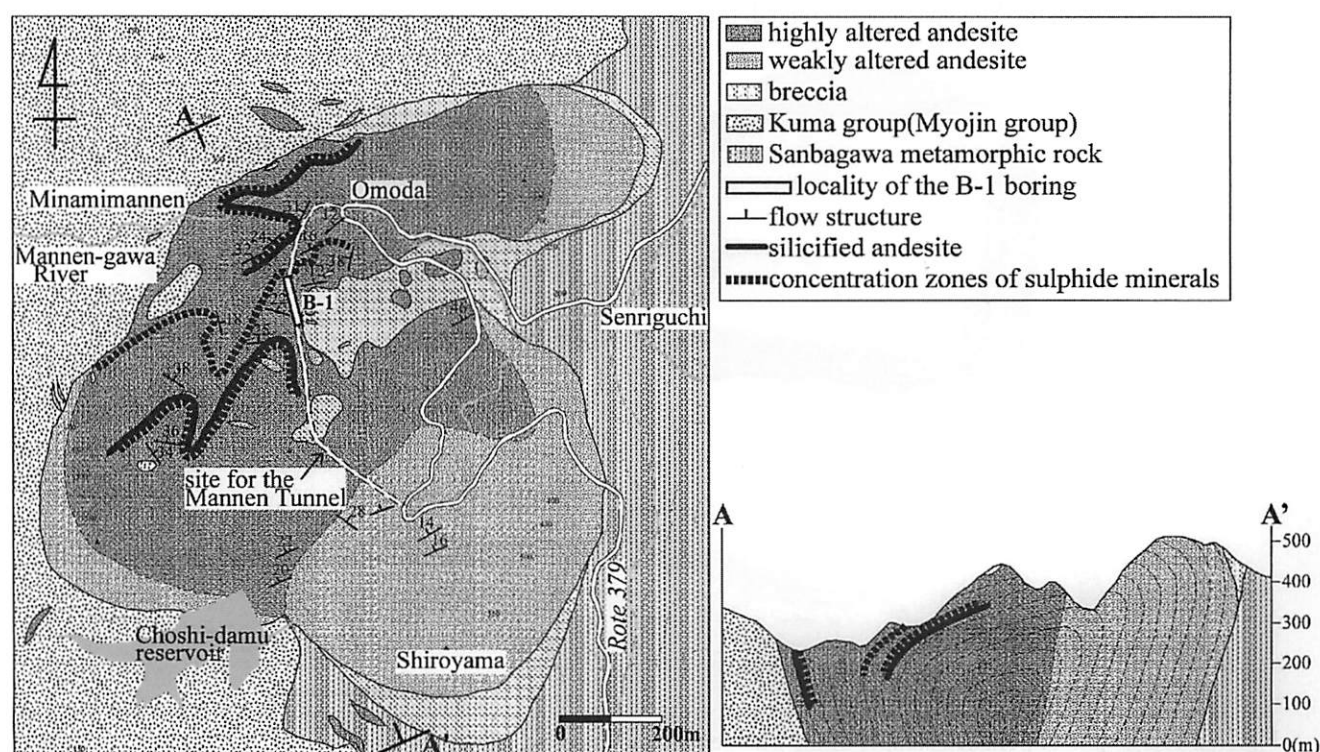


Fig. 2. Geological map and cross sections of the Mannen altered andesite.



Fig. 3. Photographs of outcrops in the Mannen area of the Tobe Town. a. Myojin Group conglomerate intercalating a lenticular sandstone, b. vertical boundary between the Myojin Group and altered andesite, c. pool and vein type of sulfide minerals in the Mannen andesite, and d. breccia including clasts of the Sanbagawa schist.

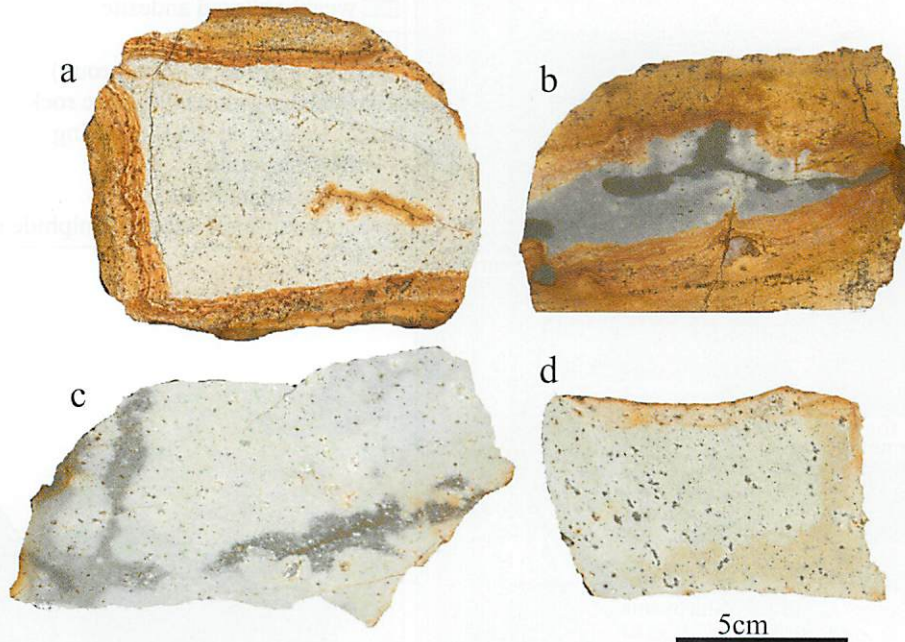


Fig. 4. Photographs of polished sample of the Mannen altered andesite. a. sparse type, b. black-ink-drawing and pool vein types characterized by the occurrences of sulfide minerals, c. black-ink-drawing and sand types, and d. spot type.

質砂岩層を含んでいる (Fig. 3.a)。これらの砂岩層の層厚は最大約 1 m で、走向・傾斜は平均するとほぼ N60°W15°N である。礫種は主に中央構造線の北側に分布する白亜系の和泉層群由来の砂岩で、まれに和泉層群の泥岩、領家帯の花崗岩類および変成岩、並びにチャートや三波川結晶片岩由来の塩基性片岩の礫が含まれている。礫岩中の礫は円磨度が高く、淘汰も良い。また、調査地域では、概して礫岩中の礫のインプリケーションが確認できる。

万年変質安山岩体の周囲では、小規模な安山岩が明神層中に岩脈として貫入している (Fig. 3.b)。また、銚子ダム湖北岸では直径約 10 m の上方に開いた円錐形のパイプ状角礫岩が見出される。このうち、銚子ダム南西部で見られる小規模貫入岩と明神層の境界部において、ペペライト様岩石が認められた。この事実は、これら安山岩が明神層の固結前に貫入したことを示唆している。

3. 三波川結晶片岩の角礫岩

本調査地域には、貫入岩体と調和的な結晶片岩の礫を主体とする角礫岩が分布する。この角礫岩は、従来、第三紀久万層群の二名層と解釈されてきた。しかしながら、この角礫岩が、万年変質安山岩体の東側を取り囲むように分布していること、および同岩体中の角礫岩基質に安山岩が認められることから、いわゆる二名層ではなく、安山岩が貫入前に形成された角礫パイプの一部を見ている可能性もある。この成因については、今後、詳細に検討する必要がある。

角礫岩の礫種は主に塩基性片岩であり、まれに泥質片岩および珪質片岩が含まれる。また、長谷林道南部では粒径が 1～10 mm 程度の細礫層が挟在しているのが見られる。角礫岩は概して基質に乏しく、円磨度が悪い (Fig. 3.d)。

4. 万年変質安山岩

本研究の対象とする変質安山岩体は、国道 379 号線沿いの万年から銚子ダム周辺にかけて分布する南北 1.5 km、東西 1 km のパイプ状貫入岩体である。本論文では、この岩体を「万年変質安山岩体」と呼ぶことにする。万年安山岩と三波川結晶片岩との境界は約 70° 前後で、円錐状の形状を示す (Fig. 2)。万年変質安山岩体の原岩は斜方輝石安山岩であるが、その

大部分が貫入後の熱水変質作用によって変質している。また、調査地域中央部の尾根に近い領域では、幅 20～40 m 程度の明神層の礫岩層が万年変質安山岩体中に見出される。

万年変質安山岩体は、変質の程度に基づいて、弱変質安山岩および強変質安山岩に区分される (Fig. 2)。岩体南部は弱変質安山岩であるのに対し、岩体北部は様々な岩質・組織を示す強変質安山岩によって構成される (Fig. 3.c)。

弱変質安山岩は強変質安山岩体を取巻くような分布を示し、銚子ダム東部および北西部、オモダ東部に分布している (Fig. 2)。この岩相は硬質で緑色および暗緑色、灰色もしくは灰黒色で緻密な硬質の安山岩で、柱状節理が発達している。表層部分は褐色に風化しているが、風化部は表面から数 mm～数 cm 程度である。

強変質安山岩は概して白色を呈し、南万年地域に分布している (Fig. 2)。それは硫化鉱物に富むタイプ、珪化しているタイプ、および粘土化しているタイプに区分され、硫化鉱物が特徴的な産状・組織を示す。まれに、この岩相中には灰色および灰黒色の弱変質安山岩が見出される。

万年変質安山岩の岩石記載

1. 弱変質安山岩

この原岩は斜方輝石安山岩である。初生鉱物は斑晶が斜方輝石および斜長石で、石基は斜方輝石、斜長石、石英、不透明鉱物およびガラスによって構成される。一般に流理構造が顕著である (Fig. 4)。

初生構成鉱物はすべて二次鉱物によって置換されているが、初生鉱物の仮像の自形性および石基の初生的組織は保存されている。変質鉱物は、石英、アルバイト、緑泥石および炭酸塩鉱物で、少量の黄鉄鉱が含まれる。また、水酸化鉄が表層もしくは割れ目にそって形成されている。斜方輝石斑晶はすべて仮像で、緑泥石によって置換されている。斜長石はアルバイト化しており、斑晶の周囲および割れ目に沿って炭酸塩鉱物が形成されている。

代表的鉱物組合せは石英＋緑泥石＋炭酸塩鉱物＋黄鉄鉱、石英＋緑泥石＋炭酸塩鉱物＋イライト＋黄鉄鉱、石英＋緑泥石＋イライト＋黄鉄鉱である。

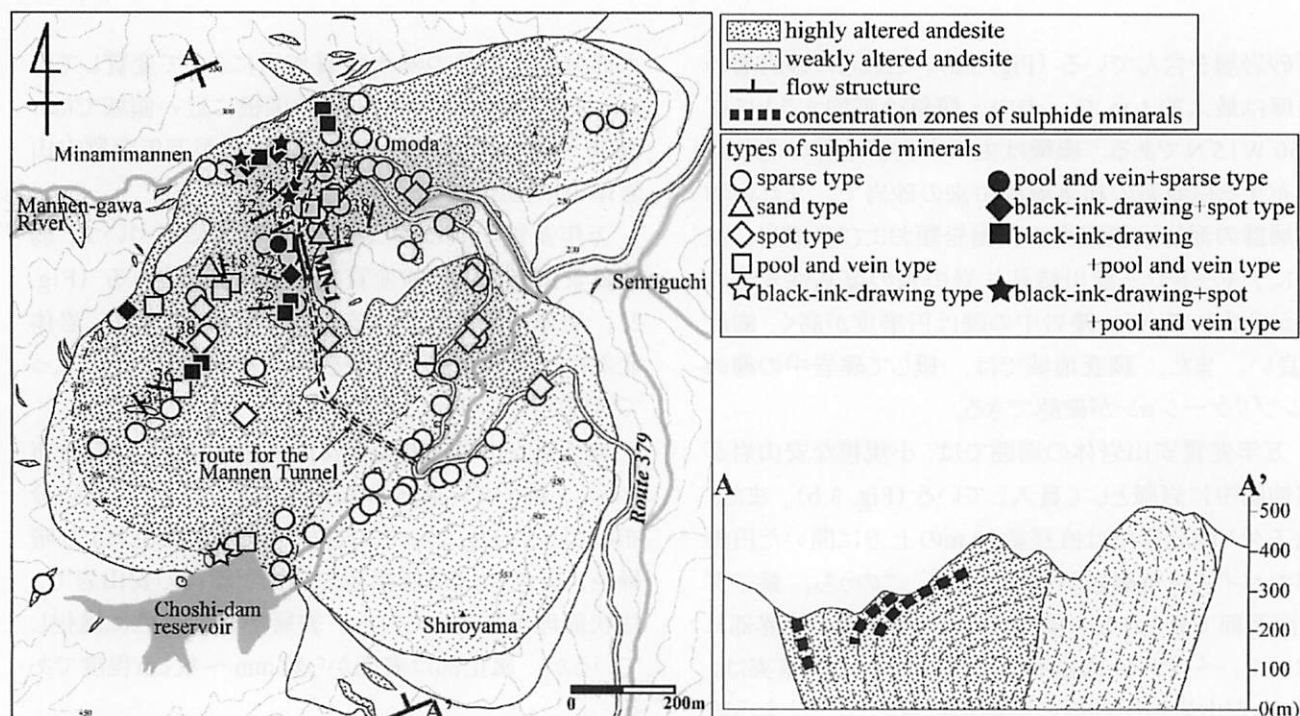


Fig. 5. Distribution of sulfide mineral types in the Mannen altered andesite.

2. 強変質安山岩

強変質安山岩は南万年およびオモダ地区に主に分布する。多く場合、原岩の組織はほとんど認められない (Fig. 4)。変質鉱物が流理構造に沿って配列しているのが確認できる。構成鉱物は、石英、イライト、カオリナイト、アナターゼ、黄鉄鉱、白鉄鉱、硫砒鉄鉱、褐鉄鉱、閃亜鉛鉱、炭酸塩鉱物、不透明鉱物で、まれにオパールも見出される。主な硫化鉱物は、黄鉄鉱、白鉄鉱および硫砒鉄鉱である。また、イライトおよび炭酸塩鉱物、石英、黄鉄鉱が斑点状の組織を形成しているのが確認できる。

変質安山岩は硫化鉱物に富むタイプ、珪化ならびに粘土化が進んだタイプに分けられる。硫化鉱物に富むタイプに関しては、後述する。珪化が進んだ変質安山岩は硬質で、青灰白色もしくは乳白色を呈する。粘土化したそれは空隙に富み、脆く崩れやすく、灰白色を呈する。また、顕微鏡下では、石英のプールが確認できる。また、まれに球形に近い孔が多数見られる組織が見られる。孔の直径は肉眼で分かる程度 (最大 1 cm 程度) の大きさのものから数 100 μm まで多様である。それらは、もともと炭酸塩鉱物によって充填されていたと推定される。

また、銚子ダム湖北側の強変質安山岩は部分的に

角礫化しており、その基質部は石英に充填されている。基質に乏しい部分はジグソーパズル様の構造を示す。このような組織は熱水による水圧破砕によって形成されたと考えられる。

代表的鉱物組合せは石英+イライト+黄鉄鉱、石英+イライト+黄鉄鉱 (+炭酸塩鉱物) および石英+イライト+黄鉄鉱+白鉄鉱+硫砒鉄鉱の組合せである。このタイプでは、炭酸塩鉱物および緑泥石がほとんど見いだされない。

万年安山岩体における硫化鉱物の産状

万年安山岩体において、肉眼および顕微鏡サイズで様々な産状の硫化鉱物が観察される。ここでは、万年変質安山岩体の強変質部において掘削された B-1 ボーリングコア試料を用いた榊原ほか (2005) による硫化鉱物の産状・組織の区分 (散点状、砂状、斑点状、墨流し状およびプール・脈状) に従った。ここでは、その定義および特徴を簡潔にまとめる。

1. 散点状

肉眼で、0.2 mm 以下の硫化鉱物が安山岩中に散在しているタイプである (Fig. 4.a)。岩石中の硫化鉱物のモードは 0.1 % 以下である。このタイプは変質の程

度に関係なく産出する。

2. 砂状

肉眼で、細粒の硫化鉱物が砂状に点在しているタイプである(Fig. 4.c)。反射顕微鏡下では、粒径が0.1～2 mm程度の硫化鉱物が岩石中に点在している。硫化鉱物の岩石中のモードは3 %以上である。

3. 斑点状

肉眼で、0.2～5 mm程度の硫化鉱物の集合体が安山岩中に点在しているタイプである(Fig. 4.d)。岩石中のモードは2 %以上である。このタイプは墨流し状硫化鉱物と共存することがある。強変質安山岩中に広域的に分布する。

4. プール状・脈状

このタイプの硫化鉱物は、割目沿いに形成される脈状もしくは不規則な形状を示すプール状である(Fig. 4.b)。硫化鉱物の集合体の長径は、最大で8 cmを超える。プール状・脈状を形成する硫化鉱物は、細粒な黄鉄鉱の集合体によって構成されている。強変質安山岩中に広域的に分布する。

5. 墨流し状

墨流し状は微粒(<0.1 mm)の自形硫化鉱物が密集することで特徴づけられる(Fig. 4.b,c)。肉眼では、硫化鉱物に乏しい白色部と微粒硫化鉱物が層状、レンズ状もしくは不規則な形状で配列し、不規則な縞模様を形成している。硫化鉱物の岩石中のモードは15 %以上である。このタイプは、白鉄鉱および硫砒鉄鉱を含む。強変質安山岩中に見出される。

万年変質安山岩体における硫化鉱物タイプの分布

万年変質安山岩体における硫化鉱物タイプの分布をFig. 5に示す。硫化鉱物タイプのうち、砂状、斑点状、プール・脈状および墨流し状は万年変質安山岩体の北西部に広く分布する。一方、岩体南東部(銚子ダム貯水池の東側)は、弱変質安山岩によって特徴づけられ、散点状の硫化鉱物しか見出し出されない(Fig. 5)。

考 察

万年変質安山岩体では、その北西部が強変質安山

岩で、南東部が弱変質安山岩である。さらに、硫化鉱物に富む砂状、斑点状、プール・脈状および墨流し状タイプは強変質安山岩の領域に限られる(Fig. 2)。したがって、万年安山岩体は、貫入後、その上部が浸透する熱水によって広範囲に強変質作用を受けたと考えられる。以下、同岩体の形成・変質史について考察する。

① 安山岩質マグマが三波川結晶片岩および明神層の境界部に形成された角礫パイプ(ダイアトリーム)中に貫入する。

② 固結後、約200～300℃の中～アルカリ性の熱水(吉村, 2001)が主に岩体上部に浸透し、全体に熱水変質作用を受ける。

③ その後、約100～200℃の酸性の熱水(吉村, 2001)が流入し、局所的に粘土化がおこる。この熱水によって黄鉄鉱は一部溶解し、イライトがカオリナイトに置換される。溶脱されたSiO₂はプール状の石英として再沈殿する。

結 論

愛媛県砥部町に分布する中期中新世の万年変質安山岩体は広域的に熱水変質作用を受けている。産出する変質鉱物は、石英、イライト、カオリナイト、アナターゼ、炭酸塩鉱物、緑泥石、黄鉄鉱、白鉄鉱および硫砒鉄鉱を主とする。強変質安山岩は岩体上部に限られ、硫化鉱物はほぼ流理構造に沿って形成されている。硫化鉱物タイプの分布は、墨流し状、プール状・脈状、砂状、斑点状が南万年を中心として強変質安山岩中に見られるのに対し、散点状は、安山岩の変質の程度に関係なく岩体全体に分布する。

変質鉱物組み合わせに基づくと、熱水活動初期の熱水の性質は中性～アルカリ性で、200～300℃であったと推定される。その後、約100～200℃の酸性の熱水が流入し、局所的に粘土化したと推定される。

謝 辞

本研究で用いたボーリングコア試料は、愛媛県松山地方局伊予土木事務所に提供していただき、試料観察の際には㈱OYO四国支社に便宜を図っていただいた。以上の関係機関および企業の関係する方々に謝意を表す。本研究の研究費の一部は、平成16年度

愛媛大学研究開発支援経費（特別推進研究）が使用された。

文 献

愛媛県地質図編集委員会, 1991, 愛媛県地質図. 株式会社トモエヤ商事.

Ishihara, S., 1978, Metallogenesis in the Japanese island arc systems. *J. Geol. Soc. London.*, **135**, 389-406.

宮久三千年・堀越和衛・槽垣淳・佐川浩之, 1974, 砥部陶石ーその現状と将来性ー. 砥部町産業課, pp.12.

永井浩三・堀越和衛, 1953, 愛媛県伊予郡砥部町付近の第三紀層. 愛媛大学紀要, 第Ⅱ部(科学), **1**, **4**, 119-132.

榊原正幸・中井芳恵・千葉悦子・近石沙知子・佐野栄・堀利栄, 2005, 愛媛県砥部町の万年変質安山岩体のボーリングコアにおける硫化鉱物の産状および砒素濃度. 愛媛大学理学部紀要, **11**, 27-38.

須鎗和己・岩崎正夫・鈴木堯士, 1991, 日本の地質 **8** 「四国地方」. 共立出版株式会社, pp. 266.

田崎耕市・高橋治朗・板谷徹丸・Grapes, R. H.・鹿島愛彦, 1990, 四国北西部の中央構造線に貫入した安山岩の K-Ar 年代. 岩鉱, **85**, 155-160.

田崎耕市・加々美寛雄・板谷徹丸・永尾隆志, 1993, 四国北西部の中央構造線に沿う酸性火山岩の起源と K-Ar 年代. 地質学論集, **42**, 267-278.

吉村尚久, 2001, 粘土鉱物と変質作用. 地学双書 **32**, pp.293.