

山口地域の白亜紀環状岩脈とコールドロン

Cretaceous ring dikes and a cauldron in the Yamaguchi area, Southwest Japan

武田賢治*

今岡照喜**

Kenji Takeda*

Teruyoshi Imaoka**

1998年10月5日受付.

1999年3月10日受理.

* 山口大学教育学部地学教室.

Institute of Earth Science, Faculty of Education, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8513, Japan.

** 山口大学理学部地球科学教室.

Department of Earth Sciences, Faculty of Science, Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8512, Japan.

Abstract

Cretaceous ring dikes are well exposed in the Yamaguchi area, Southwest Japan. They consist of silicic to intermediate igneous rocks, welded lapilli tuff and intrusive breccia, and can be divided into two groups, i.e. older and younger ring dikes, based on stage of emplacement. Geological data from the area indicate that the ring dikes have been intruded along ring faults and the block surrounded by ring dikes was cylindrically subsided at two stages. The subsided block contains probable remnants of caldera-fill sequence that is represented by the Cretaceous Shunan and Abu Groups; no outflow of volcanic sequence was preserved. These data suggest the presence of a cauldron, named the Yamaguchi cauldron, which is elliptical (15×13 km) in plan.

The older ring dikes were probably emplaced along ring fractures and ring faults during dacitic pyroclastic eruptions and caldera collapse of the Shunan Group. Locally preserved welded lapilli tuff dikes represent a vent of the eruptions. A vertical compaction foliation in the tuff dikes can be ascribed to closure of vent during the caldera collapse. Subsequent injection of silicic to intermediate magmas from a magma chamber formed Kumano quartz diorite, Izuruha acid rocks (granodiorite porphyry and plagiophyre) and Katsuragadake granite porphyry.

After the volcanism of the Shunan Group, the cauldron was invaded by granite batholith (Hiroshima granites). Thereafter subsidence occurred again nearly at the same position as the early caldera. This second subsidence was probably related to rhyolitic pyroclastic eruptions of the Abu Group. The younger ring dikes such as intrusive breccia, quartz porphyry and granite porphyry were emplaced along the reactivated ring faults. The intrusive breccia can be regarded as a product of hydrothermal explosion which was presumably triggered by upward emplacement of silicic magma that formed later quartz porphyry along ring fault from a magma chamber. Interaction of magma and water involved within the intrusive breccia resulted in formation of a local small-scale peperite at the boundary between quartz porphyry and intrusive breccia. Thus, the Yamaguchi cauldron was formed by discontinuous volcanism of two stages.

Key words: ring dike, cauldron, intrusive breccia, welded tuff dike, peperite, Cretaceous, SW Japan

はじめに

西南日本内帯には、白亜紀の珪長質火山岩類および関連深成岩類が広範囲に分布している。山口県のほぼ中央部に位置する山口地域も白亜紀火山-深成活動場の一部であった。最近筆者らは、この地域において、貫入時期の異なる複数の岩脈類から構成される環状岩脈が存在していることを見だし、その産状と周辺地質のデータを総合的に検討した結果、一つのコールドロンが存在するとの結論を得た。この環状岩脈はおもに珪長質～中間質貫入岩類から構成されているが、溶結火砕岩や熱水火道角礫岩〔本論では記載用語として貫入性角

礫岩 (Wright and Bowes, 1963) の岩石名称を用いる〕を伴っており、また岩脈周辺にマグマ/水相互作用によって形成されたペペライトが小規模に存在している。これら各種岩脈の産状、岩石学的特徴および形成順序を明らかにすることは、環状割れ目や環状断層に沿う火道で起こった諸現象や過程、さらには陥没カルデラの形成過程を解明する上で重要である。

本論では、まず最初に環状岩脈を構成する各岩脈の産状と記載岩石学的特徴および岩脈相互の関係を記述する。とくに溶結火砕岩岩脈と貫入性角礫岩については、詳細に記載し、成因を議論する。その後、コールドロンと認定した証拠を示

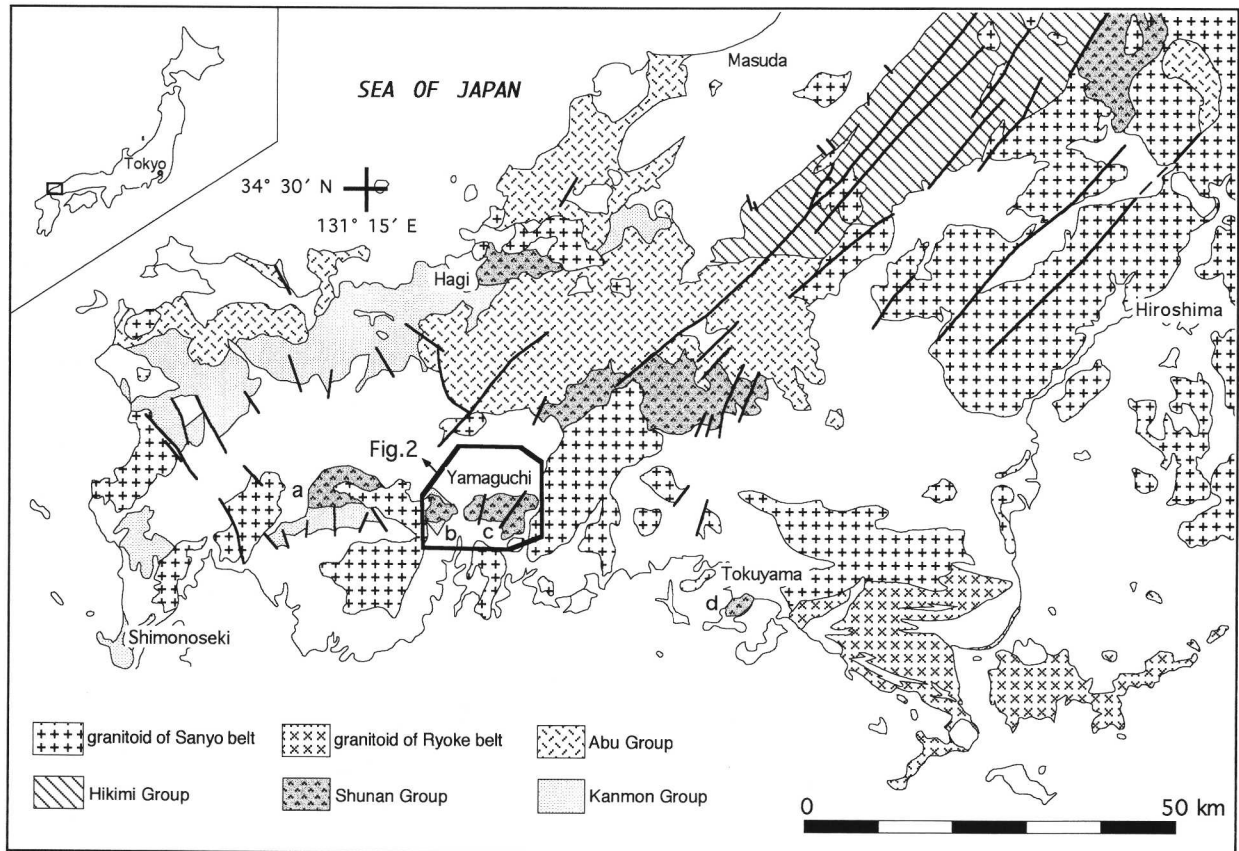


Fig. 1. Map showing a distribution of Cretaceous volcanic rocks and related granitoids in western Chugoku district (after Murakami and Imaoka, 1986) and the location of study area. Locations of Kibe (a), Zenjoji (b), Hirano (c) and Taikazan (d) bodies of the Shunan Group in Sanyo province are also shown (after Murakami and Matsusato, 1970). Inset shows the location of Fig. 1 with respect to Japan.

し、環状岩脈の解析結果に基づいてコールドロンの形成史を考察する。

地質概説

中国地方西部における白亜紀の花崗岩類と火山岩類の分布を Fig. 1 に示す。花崗岩類は領家帯花崗岩類とその北側に分布する山陽帯花崗岩類とに大別され (Ishihara, 1971; Murakami, 1974), 火山岩類は下位から、関門層群, 周南層群, 匹見層群および阿武層群に区分される (村上・今岡, 1986)。このうち周南層群は陸上に噴出した安山岩質～流紋岩質火山岩類から構成され、瀬戸内側に分布する禪定寺山累層, その北側に分布する物見岳累層および田床山火山岩類に区別される (村上・西野, 1967; 西南日本内帯後期中生代火成活動研究グループ, 1967)。Murakami and Matsusato (1970) は、禪定寺山累層が東西に並置された4つの独立した火山体, すなわち西から東に向かって、吉部岩体, 禪定寺山岩体, 平野岩体, 太華山岩体から構成され (Fig. 1), 太華山岩体を除くそれぞれの火山体がコールドロンを形成していると推定した。

山口県のほぼ中央部に位置する山口地域 (山口市, 小郡町, 美東町南部, 宇部市北東部および防府市西部を含む) には、関門層群と周南層群禪定寺山累層の禪定寺山岩体と平野岩体が分布する (Fig. 2)。これら白亜系の基盤は、大部分がトリアス紀の変成年代を示す周防変成岩 (Nishimura, 1990) から構成されるが、一部にベルム系宮野層相当層 (Kawano, 1961) がある。基盤は本地域の北部と南西部に露出している。白亜系と基盤とは不整合関係あるいは断層関係にある。

関門層群の主要な分布地は南西部の嘉川地域と禪定寺山北西方である (Fig. 2)。そのほか山口市平野, 小鱈などに狭小に分布する。本層群は陸成の下部白亜系で、下位の脇野垂層群と上位の下関亜層群とに区分される (松本, 1951)。前者は礫岩・砂岩・頁岩の互層からなり、後者は礫岩・砂岩・赤色頁岩互層と安山岩質～デイサイト質火山岩類からなる (長谷, 1958)。本層群は周南層群に不整合に覆われる (西南日本内帯後期中生代火成活動研究グループ, 1967)。

周南層群禪定寺山累層は本地域の中央部を東西に分布する (Fig. 2)。Murakami and Matsusato (1970) によると、本層はおもに乾陸上に噴出した火山岩類からなり、それらは形

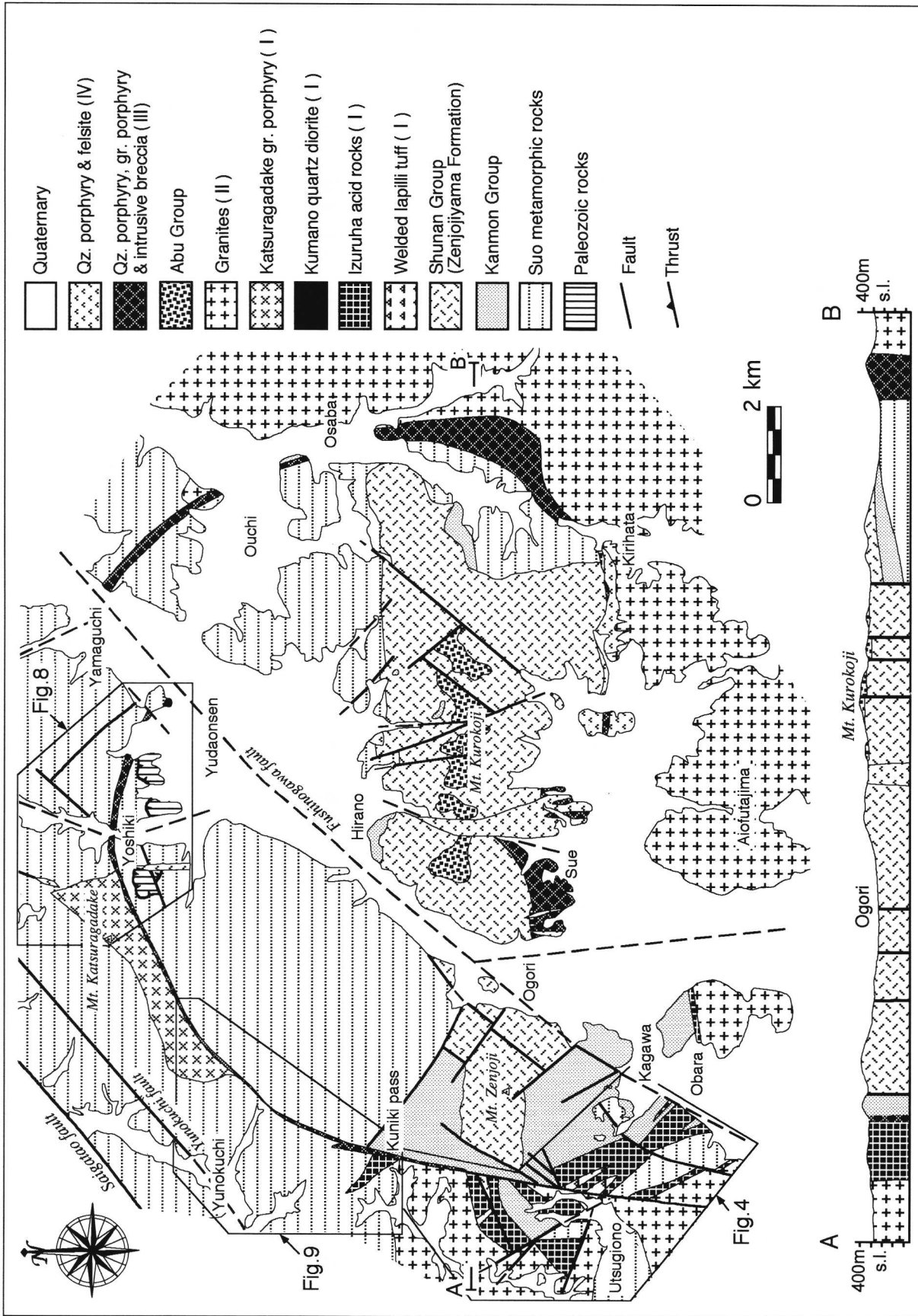


Fig. 2. Geologic map of the Yamaguchi area, SW Japan. Abbreviations in legend: Qz; quartz, gr; granite. I ~ IV in parentheses same as those in Fig. 3.

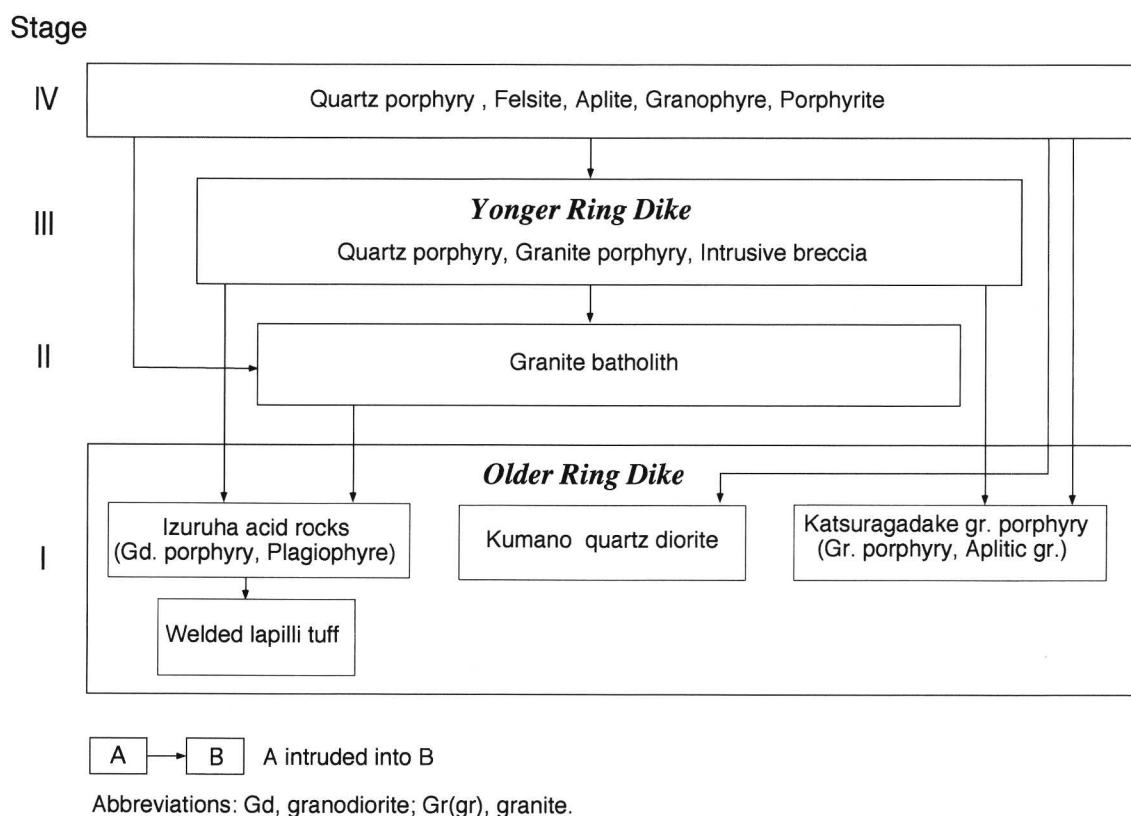


Fig. 3. Geological relationships of late Cretaceous intrusive rocks in the Yamaguchi area.

成時期によってI期(安山岩質溶岩・凝灰岩・凝灰角礫岩), II期(流紋岩質～デイサイト質凝灰岩・凝灰角礫岩・溶結凝灰岩・凝灰質砂岩・頁岩・礫岩)およびIII期(流紋デイサイト質～デイサイト質溶結凝灰岩・貫入性角礫岩)に大別されている。地質時代はセノマニアン～チューロニアンとみなされている(西南日本内帯後期中生代火成活動研究グループ, 1967)。筆者らのこれまでの予察的調査では, 周南層群とされている火山岩類はおもにデイサイト質火砕岩類から構成され, その上に流紋岩質結晶凝灰岩が重なっていることがわかっていて。この流紋岩質結晶凝灰岩は, 後で議論されるように, 周南層群ではなく, 阿武層群に属する可能性が高い。

白亜系とその基盤を貫いて, 白亜紀の貫入岩類が発達している(Fig. 2)。それらはバソリスをなす花崗岩類と脈岩類とに大別される。花崗岩類は本地域の東部(小鯖～防府市切畑), 南部(山口市秋穂二島)および西部(稔小野～小野)に広く分布する。脈岩類は本地域のいたるところに分布し, それらは石英閃緑岩・斜長斑岩・ひん岩・花崗閃緑斑岩・石英斑岩・花崗斑岩・珪長岩・文象斑岩・アプライトからなっている。そのほか溶結火山礫凝灰岩岩脈と貫入性角礫岩が認められる。これらの脈岩類の中で, 本地域南西に分布する斜長斑岩と花崗閃緑斑岩からなる複合岩脈は出葉酸性岩類(村上・光田, 1954; 村上, 1960)と呼ばれている。

上記の貫入岩類は貫入関係, 接触変成作用の有無および岩

石学的特徴に基づき, 4つの形成ステージ(I, II, III, IV)に区分することができる(Fig. 3)。ステージIIはバソリスをなす広島花崗岩類の貫入期であり, 他の3つのステージは脈岩類の貫入期である。ステージIの脈岩類は出葉酸性岩類とそれに密接に随伴する溶結火山礫凝灰岩岩脈で代表されるが, 熊野石英閃緑岩(新称)と桂ヶ岳花崗斑岩(新称)もこの時期のものとして推定される。ステージIIIの脈岩類は石英斑岩, 花崗斑岩および貫入性角礫岩から構成される。ステージIVの脈岩類は上記の花崗岩類・脈岩類などを貫く石英斑岩・珪長岩・アプライト・文象斑岩・ひん岩などで, 一般に小規模なものが多い。ステージIとステージIIIの脈岩類の分布は全体として環状をなし, 環状岩脈を形成している。前者のステージの環状岩脈を古期環状岩脈, 後者のステージの環状岩脈を新期環状岩脈とそれぞれ呼ぶことにする。

本地域に発達する断層は, ベルム系宮野層相当層のクリッペの下底に発達する衝上断層(小澤, 1929; 吉野, 1954), コールドロン壁を表わすと考えられる環状断層およびそれらの断層より後期の高角断層群に大別できる。高角断層群はNE-SW方向とNW-SE方向のものが卓越し, なかでも樫野川断層(高橋ほか, 1961), 湯ノ口断層(武田, 1986)およびオケ峠断層[Kobayashi (1941)のオケ峠構造線]が大規模である。

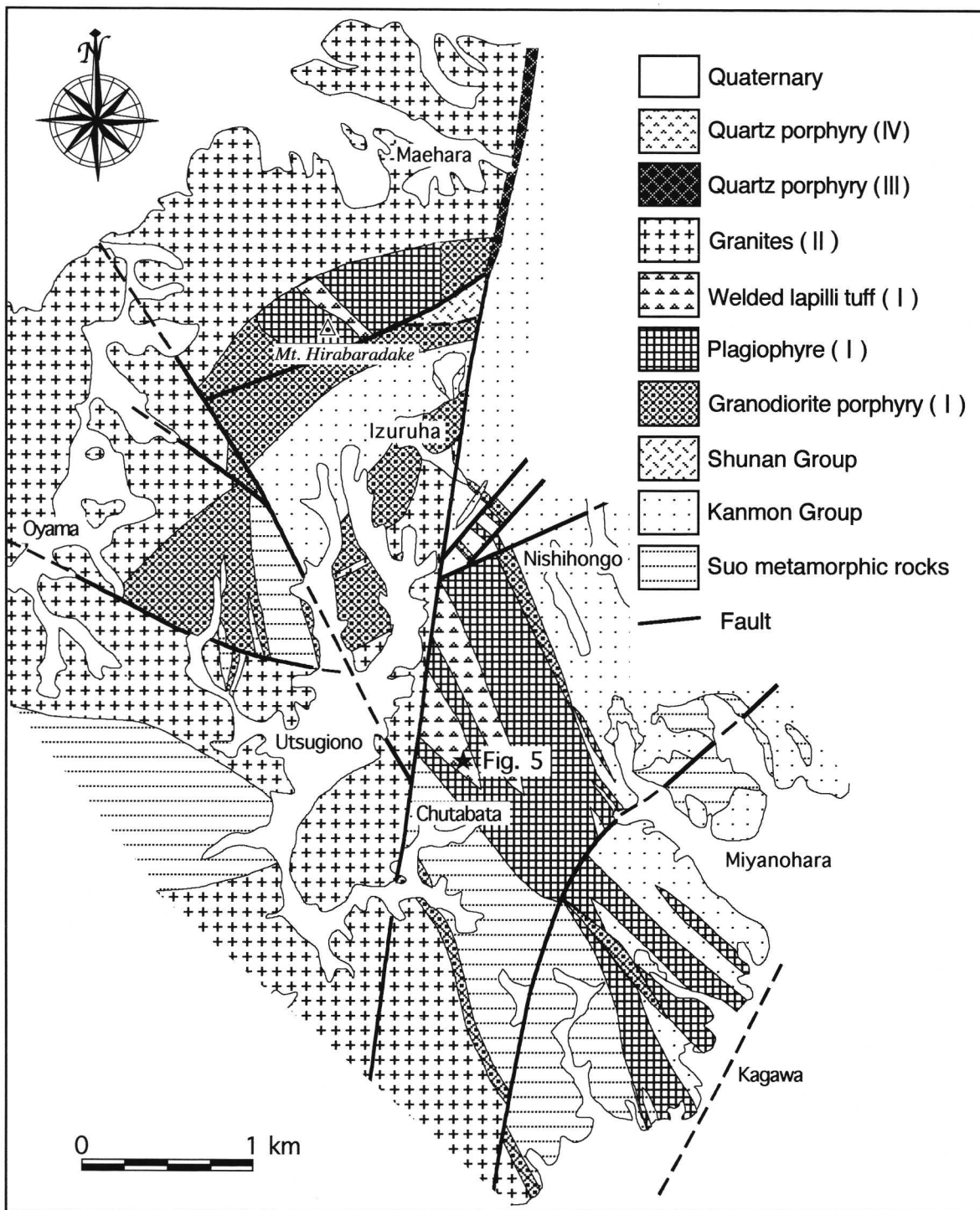


Fig. 4. Geologic map of the Utsugiono-Kagawa area. Location shown in Fig. 2.

環状岩脈の産状・岩石記載および岩脈相互の関係

1. 古期環状岩脈

古期環状岩脈は出葉酸性岩類とそれに伴う溶結火山礫凝灰岩、桂ヶ岳花崗斑岩および熊野石英閃緑岩から構成される。

a. 出葉酸性岩類

[産状]

本岩類は、宇部市平原岳～山口市嘉川を模式地として分布する花崗閃緑岩と斜長斑岩からなる複合岩脈状岩体に対して、村上・光田 (1954) によって命名された (Fig. 4)。この花

崗閃緑岩として記載された岩石は、大部分が斑状組織の顕著な岩石であり、むしろ花崗閃緑斑岩と呼ぶのが適当である。そこで、本論では花崗閃緑斑岩の岩石名称を用いることにする。

村上・光田(1954)と村上(1960)は出葉酸性岩類を構成する花崗閃緑斑岩と斜長斑岩の関係を詳細に記載し、それらはほぼ同時期あるいは後者が前者よりやや遅れて貫入したものとした。また、斜長斑岩は花崗閃緑岩質マグマからの絞り出し作用(filter pressing)によって生じた可能性を指摘した。今回、花崗閃緑斑岩と斜長斑岩とが幅数mm以下の狭い範囲で移り変わり、いずれの側にも急冷周縁相は発達していないことが観察されたことより、両岩石の形成時期に大きな時間間隙はなかったと考えられる。

模式地の本岩類は断層運動によって著しくブロック化している。山口市^{ちゅうたばた}中田畑と出葉を通るN8°E方向の断層はとくに大規模で、明瞭なリニアメントをなしている。この断層は後述の第二次陥没の環状断層の一部に相当するものである。この断層の東側に分布する本岩類は、初生的な貫入方位を示しているものと考えられ、NNW-SSE方向に最大幅約1kmで周防変成岩と関門層群中に貫入している。西本郷では、本岩類が関門層群の西縁に発達する断層に沿って貫入している様子が観察される。中田畑南方には、周防変成岩とその西方に分布する花崗岩類との境界部に沿って出葉酸性岩類の花崗閃緑斑岩に相当する岩脈が発達している。この岩石はかつて村上(1959, 1960)によって角閃石黒雲母花崗斑岩として記載され、花崗岩類より後のステージに貫入したストックとみなされていたものである。しかしこの岩石は、花崗岩類によって接触変成作用を受けていること、出葉酸性岩類の貫入方向に平行に延びる岩脈状を呈していること(Fig. 4)、および岩相の類似性より出葉酸性岩類に属すると考えられる。したがって、南部では本岩類は2列に並置されていることになる。

本岩類は、上述のN8°E方向の断層以西では、花崗岩類と貫入接触あるいは断層関係にあり、全体として花崗岩類に取り囲まれたような分布形態を示している。前原一大山間と稔小野一出葉間では、本岩類は花崗岩類に貫かれ、それによって接触変成作用を蒙っている。Fig. 4に見られるように、平原岳北方では、本岩類と花崗岩類の境界は明瞭で、その地質境界線(NE~ENE方向)は本岩類の花崗閃緑斑岩・斜長斑岩複合岩脈の延び方向(NW-SE~NS方向)と高角度で交わっており、本岩類が花崗岩類に切られていることが地質図上からも読みとることができる。

模式地以外では、本岩類は宇部市^{おおぼら}国木峠付近、山口市大原、同市陶および防府市切畑に分布するが、いずれも小規模である(Fig. 2)。国木峠付近では、花崗閃緑斑岩が周防変成岩中に貫入し、その東縁は新期環状岩脈に属する石英斑岩岩脈によって貫かれている。この花崗閃緑斑岩は南西方に分布する花崗岩類による熱的影響を顕著に受けている。大原では、花崗閃緑斑岩が関門層群の南縁に沿ってENE-WSW方向に貫入している。花崗閃緑斑岩岩脈と関門層群の地層は隣接する花崗岩類によって接触変成作用を蒙っている。陶と切畑では、周南層群の南縁に沿って、それぞれ花崗閃緑斑岩と斜長

斑岩がほぼE-W方向に貫入している。陶の花崗閃緑斑岩は新期環状岩脈に属する花崗斑岩岩脈によって接触変成作用を受けている。

[岩石記載]

花崗閃緑斑岩は優黒色、塊状の岩石であるが、部分的に斜長石斑晶の定向配列によって示される流理構造が認められることがある。斑晶は斜長石・角閃石・黒雲母・石英で、少量のカリ長石や、まれに単斜輝石を伴う。これらの斑晶鉱物は一般に自形で、斜長石で最大5mm程度、その他の鉱物で最大2~3mm程度である。斜長石はしばしば集斑状組織を呈する。また、累帯構造が顕著で、部分的に絹雲母化している。角閃石には、カミングトン角閃石質と普通角閃石質(Z=褐色、緑色)のものが認められ、コアがカミングトン角閃石でリムが普通角閃石からなる累帯構造や、コアが褐色角閃石でリムが緑色角閃石からなる累帯構造が観察される。黒雲母は部分的あるいは完全に緑泥石化していることが多い。石基はおもに斜長石・石英・カリ長石・黒雲母・角閃石から構成され、鉄鉱・燐灰石・ジルコン・褐れん石などの副成分鉱物と絹雲母・緑泥石・緑れん石・方解石・チタン石などの二次鉱物を伴う。しばしば文象組織が発達する。再結晶した岩石では、斜長石や石英の斑晶は融食され、ギザギザとした輪郭を有する。また、角閃石斑晶は部分的あるいは完全に繊維状ないしは細粒の青緑色角閃石に置換されている。黒雲母斑晶も細粒黒雲母の集合体に分解している。石基はグラノブラスティック組織を示す。本岩には、破断面がしばしば発達し、それに沿って細粒化していたり、緑れん石脈が注入していたりする。本岩は結晶片岩(周防変成岩)や、関門層群のものと推定される砂岩・頁岩を捕獲していることがある。

斜長斑岩は灰白~暗灰色を呈し、非顕晶質石基中に自形の斜長石斑晶(径1~5mm)が目立つ岩石である。一般に塊状であるが、周縁部では流理構造が発達することが多い。斜長石のほかに黒雲母と角閃石の斑晶と、まれに石英の微斑晶が含まれる。斜長石斑晶は単独結晶あるいは集斑状結晶として産出し、部分的に絹雲母・方解石・緑れん石に置換されている。累帯構造は一般に弱い。黒雲母斑晶(径1~2mm)は変質が著しく、そのほとんどが緑泥石・チタン石・塵状鉄鉱物の集合体になっている。角閃石斑晶は1~3mm大の自形結晶で、褐色種と緑色種の両方が認められる。石基はおもに斜長石・カリ長石・石英・黒雲母・緑色~褐色角閃石から構成され、燐灰石・ジルコン・不透明鉱物などの副成分鉱物と方解石・絹雲母・緑泥石などの二次鉱物を伴う。また、緑れん石脈が観察される。再結晶した岩石では、グラノブラスティック組織を示す石基中に、融食形の斜長石・石英の斑晶、細粒黒雲母(大部分は緑泥石化)の集合体、細粒~繊維状青緑色角閃石の集合体が散在している。

b. 溶結火山礫凝灰岩

[産状]

本岩は平原岳北方と中田畑に分布する(Fig. 4)。また、西本郷では小規模な岩脈として関門層群を貫いている。Murakami and Matsusato(1970)は、出葉酸性岩類が周南層群に属する溶結凝灰岩に不整合に覆われたり、貫入性角礫

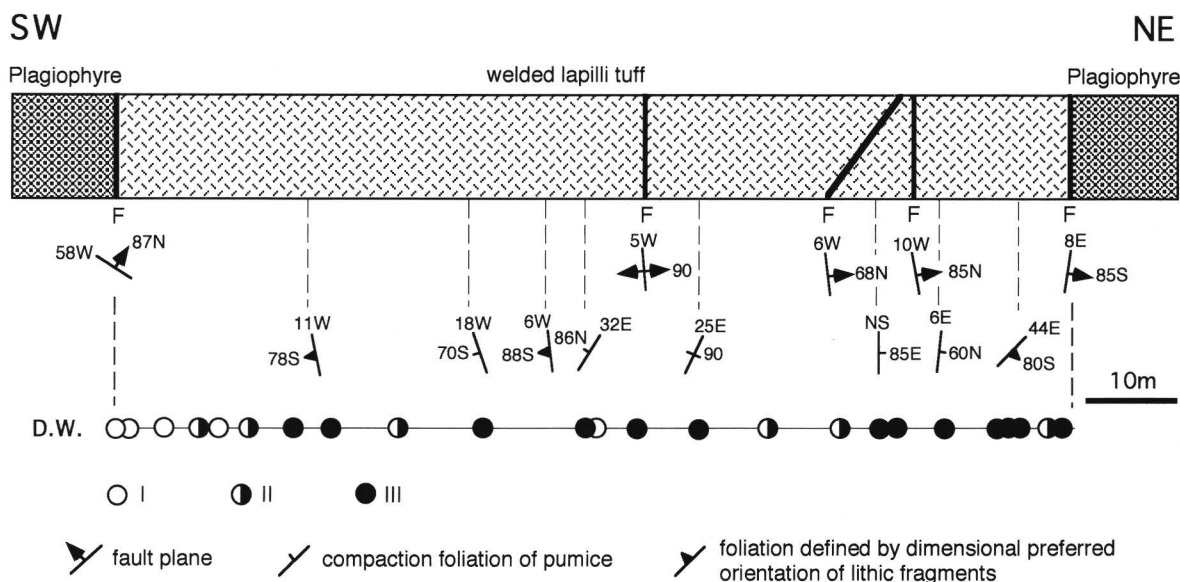


Fig. 5. Simplified sketch of an outcrop in Chutabata showing the geological relationship between welded lapilli tuff and plagiophyre, and strike-dip (degrees) of the foliation of welded lapilli tuff. Degree of welding (D.W.) roughly ranked into, I, II and III in accordance with the progressive flattening of pumice and shards, which can be seen in outcrop, hand specimen, and under the microscope, is also shown.

岩に貫かれていると述べている。今回の調査結果では、この「溶結凝灰岩」と「貫入性角礫岩」とは同じ岩相であり、それらは本論の溶結火山礫凝灰岩に相当するものであることがわかった。この溶結火山礫凝灰岩は斜長斑岩中に「岩脈状」に産する。本岩が出葉酸性岩類を不整合に覆っているところは観察されなかった。みかけの幅は最大200mに達する。

中田畑の採石場（大塔興業株式会社）には溶結火山礫凝灰岩が斜長斑岩中にみかけ上2枚発達している。今回は、とくに西側に分布する幅約106mの溶結火山礫凝灰岩について、産状と斜長斑岩との関係について調べた。Fig. 5に調査した露頭の概要と野外・鏡下観察によって得られたデータを示す。この溶結火山礫凝灰岩には小断層や破断が多く発達している。断層はほぼN-Sの走向で、高角度で傾斜するものが多い。溶結火山礫凝灰岩と斜長斑岩との関係については後で述べる。

[岩石記載]

溶結火山礫凝灰岩は凝灰質基質と種々の岩片とからなり、ユータキシティック組織を示す。凝灰質基質は一般に変質が強く、雲母粘土鉱物が多量に生じている。本質岩片には、ガラス片とデイサイト質軽石がある。ガラス片はY字形や板状を呈し、雲母粘土鉱物によって置換されていたり、脱ガラス化によって石英・長石集合体になっている。軽石片も雲母粘土鉱物によって置換されていたり、脱ガラス化している。脱ガラス化している軽石片には流理構造やクラシカルパーライト (Allen, 1988; McPhie et al., 1993) が残存していることがある。軽石片は凹凸の著しい不規則形を呈するものが多く、しばしば端部で火焰状を呈する。また、多かれ少なかれ圧密され、レンズ（フィアメ, fiamme）をなしている

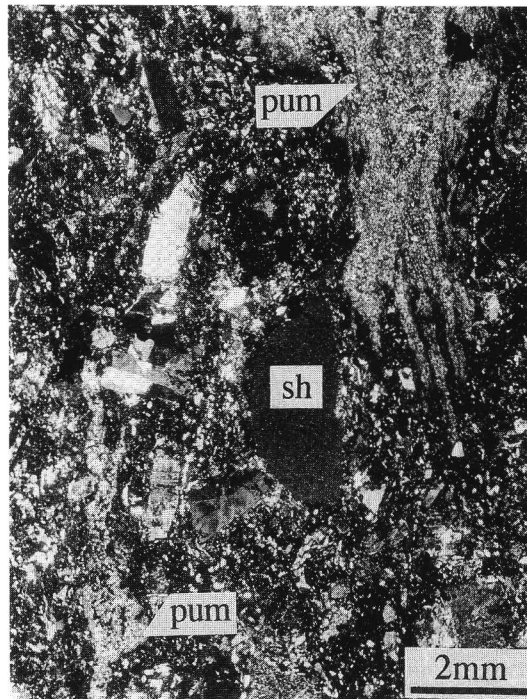


Fig. 6. Compaction foliation of flattened pumice (fiamme) in welded lapilli tuff. Note pumice in upper right exhibiting flame-like edge. Abbreviations: pum; pumice, sh; shale. Crossed polarized light.

(Fig. 6). 圧密度の高いフィアメでは長径/短径比は8に達している。圧密度の低いものでは、石英によって充填され、伸長した気孔が観察されることがある。

石質岩片は異質岩片と類質岩片から構成されるが、後者の方が多い。異質岩片は周防変成岩に由来する結晶片岩類と関門層群起源と推定される砂岩・頁岩からなる。類質岩片はおもに安山岩からなり、流紋岩やデイサイト質～流紋岩質凝灰岩（大部分は溶結）を伴う。石質岩片は平滑な面を有し、角ばったものが多い。石質岩片は火山礫サイズのものが多く、まれに10cm程度の類質岩片や70cmに達する異質岩片が観察される。結晶片としては、斜長石が最も多く、そのほか石英とアルカリ長石が含まれる。また、緑泥石仮像が観察されるが、その形態から判断して黒雲母や角閃石を置換したものと考えられる。

軽石片のコンパクションフォーメーションはNNW-SSE～NNE-SSWの走向を示し、高角度で傾斜している (Fig. 5)。その方位は斜長斑岩の一般的な貫入方位におおよそ一致している。フィアメが認められるところでは、板状の石質岩片や長石片もまた形態定向配列を示し、フィアメに平行に配列している。Fig. 5には、野外および鏡下観察に基づき、溶結の程度をおおざっぱに、弱い (I)、ふつう (II)、強い (III) の3階級に区分し、その分布を示してある。溶結の程度は南西側で弱く、北東側に向かって漸次強くなる傾向がある。岩片の粒径変化や組成変化による帯状配列はほとんど認められない。

本岩中には、炭酸塩鉱物・石英・曹長石・緑泥石・緑れん石などからなる熱水脈が発達している。これらの脈には、赤鉄鉱・磁鉄鉱・チタン鉄鉱・黄鉄鉱・黄銅鉱・方鉛鉱などを伴うものがある。

c. 斜長斑岩と溶結凝灰岩の関係

前述した中田畑の採石場の露頭 (Fig. 5) で得られた野外観察および鏡下観察の結果に基づき、斜長斑岩と溶結火山礫凝灰岩との関係を以下に述べる。

斜長斑岩と溶結火山礫凝灰岩との境界には、幅数mm～10cmのカタクレサイトからなる微小～小断層が発達している。その走向・傾斜は、南西側境界でN58°W・87°N、北東側境界でN8°E・85°Sである (Fig. 5)。カタクレサイトには炭酸塩鉱物脈が網目状に入り込んでいる。南西側に分布する斜長斑岩の東側周縁部 (幅約60cm) より採集した岩石標本の鏡下観察の結果は次のとおりである。

(1) 境界より約60cm: 珪長岩状組織を示す石基中に、おもに石英と緑泥石 (±緑れん石、不透明鉱物) によって充填され、伸長した杏仁 (最大長径約1mm) が観察される。よく伸長した杏仁では長径/短径比は8に達している。伸長した杏仁は一定方向に配列し、斜長石斑晶もそれと平行に配列する傾向が認められる。

(2) 境界より約20cm: 微文象組織を示す細粒の石英と長石からなる石基中にマイクロライト (鉱物種は未同定) の配列によって示される流理構造が発達している。

(3) 境界部 (幅約5cm): 境界面にほぼ平行に、細粒の石英・長石集合体の薄層 (<50 μ m) と隠微晶質薄層 (<10 μ m)

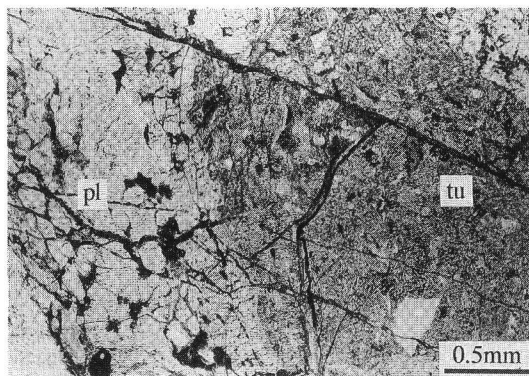


Fig. 7. Photomicrograph showing the contact between plagiophyre (pl) and welded lapilli tuff (tu). Plane polarized light.

との互層によって定義される流理構造が顕著に発達している。その流線は斜長石斑晶や球顆の周りで湾曲し、斜長石斑晶の多くはその長軸を流線に平行に向けている。最外縁部 (幅約2mm) は直径100～300 μ mの球顆の集合体から構成されている。この中にはクラシカルパーライトの痕跡が認められ、パーライトクラックは緑泥石の濃集によって識別できる。溶結火山礫凝灰岩との間には微小なカタクレサイト帯 (幅約2mm) が形成されているが、斜長斑岩の最外縁部と溶結火山礫凝灰岩とが密着接触している部分が残存している (Fig. 7)。そして、境界より約5mmの範囲の溶結火山礫凝灰岩の中に、斜長斑岩の最外縁部と同じ岩質・組織をもつ板状岩片 (厚さ1mm程度) が2・3枚、境界面にほぼ平行に配列している。

上述のように、斜長斑岩の周縁部にはマグマの過冷却によって生じるマイクロライトやかつてガラスが存在したことを証拠づけるクラシカルパーライトが観察される。また、球顆は一般にマグマの過冷却やガラスの脱ガラス化によって形成される (例えば、Lofgren, 1971a, b)。このような特徴的な組織の存在より、斜長斑岩の周縁部はガラス縁を含む急冷周縁相とみなすことができる。周縁部に発達する流理構造は、壁近くと内部との間の温度勾配によって生じたマグマの粘性の相違に起因する層流 (laminar flow) によると考えられる。また、伸長した杏仁は、マグマ中に含まれていた揮発性成分が濃集した結果生じた気孔がマグマの流動による剪断によって伸長したと解釈される。カタクレサイト帯近傍の溶結火山礫凝灰岩中に散在し、多数の球顆をもつ板状岩片は、境界面に沿う剪断によって剥ぎ取られた斜長斑岩のガラス縁の切片とみなされる。このような貫入岩体のガラス縁の切片が貫入岩体近傍の母岩中に含まれる例はPichler (1965) や伊藤ほか (1984) によっても報告されている。以上の諸点より、斜長斑岩と溶結凝灰岩との間に存在するカタクレサイト帯は後生的な軽微なすべりによって形成されたものであって、両者は初生的には貫入関係にあり、斜長斑岩が溶結火山礫凝

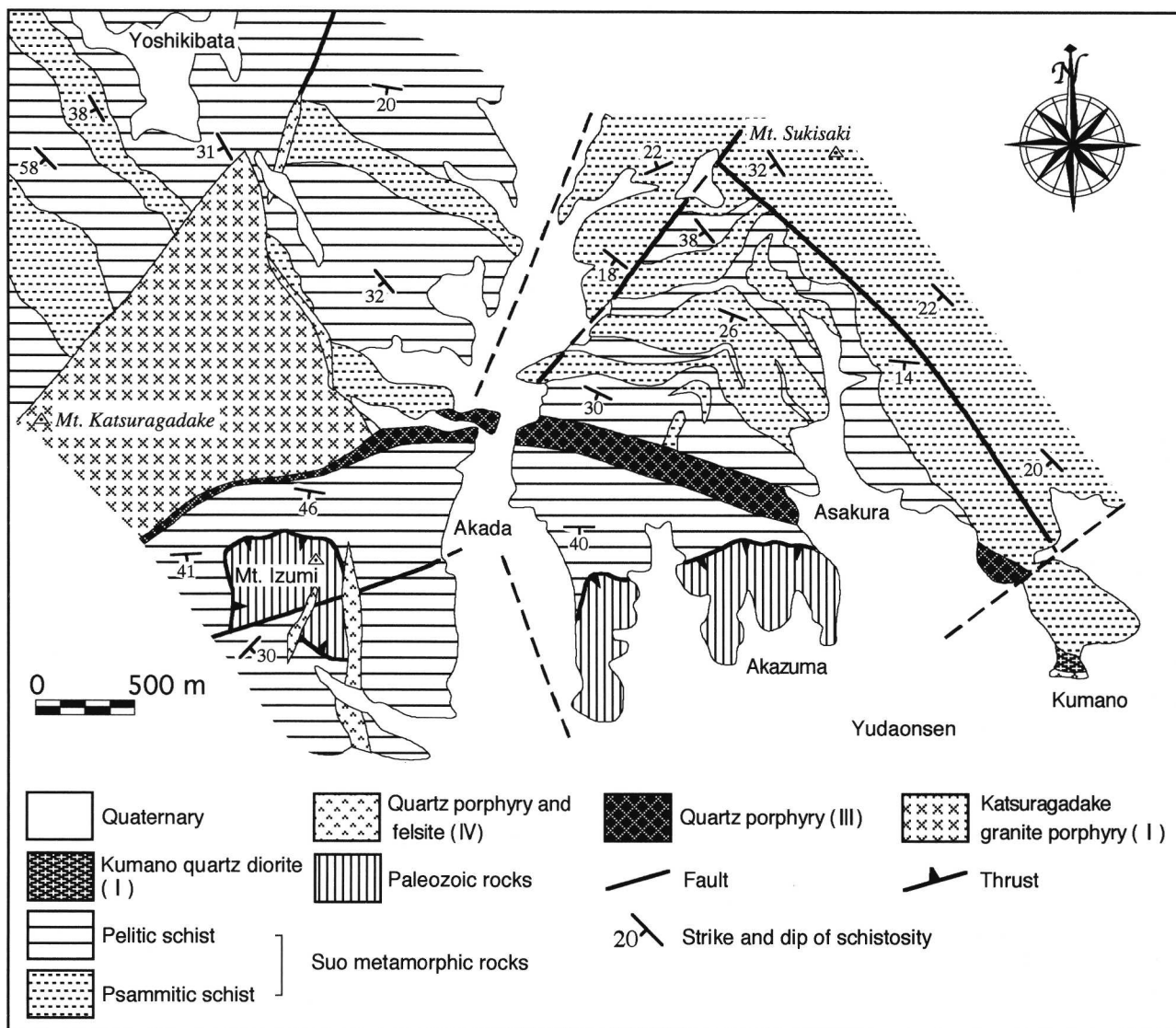


Fig. 8. Geologic map of the Yoshiki area. Location shown in Fig. 2.

灰岩中に貫入していると結論される。

d. 桂ヶ岳花崗斑岩

[産状]

本地域北西部の桂ヶ岳周辺に分布する (Figs. 2, 8)。岩体の規模はNE-SW方向に長さ5 km, 最大幅1.5 kmである。本岩は北西側では周防変成岩中に貫入し, 同岩に接触変成を与えている。貫入境界付近では周防変成岩のゼノリスを多数包有している。一方, 南東側では石英斑岩岩脈 (新期環状岩脈) に貫入されている。この石英斑岩岩脈の南東方に分布する周防変成岩には, 本岩による熱的影響はほとんど認められない。この理由については後で説明する。本岩中には細粒石英閃緑岩の暗色包有物 (径60 cm以下) がしばしば含まれており, とくに山口市吉敷の沓掛川の野口堤に至る枝川沿いで顕著である。

[岩石記載]

本岩は花崗斑岩を主岩相とするが, アプライト質花崗岩もかなり含まれている。また, しばしば幅数cm以下の石英脈が発達している。花崗斑岩は優白質, 中粒の斑状岩で, 後述の新期環状岩脈を構成する花崗斑岩に比べて斑晶・石基とも粗粒である。斑晶は石英・斜長石・カリ長石・黒雲母で, 少量の角閃石が含まれることもある。斜長石やカリ長石の斑晶には1~2 cmに達するものがある。無色鉱物の斑晶は融食され, 他形のものが多く, 有色鉱物の斑晶は自形~半自形を呈するものが多い。斜長石は累帯構造が著しい。黒雲母は部分的に緑泥石化している。角閃石にはコアが褐色, リムが青緑色の累帯構造が観察される。石基はおもに他形の石英・斜長石・カリ長石・黒雲母からなり, ジルコン・燐灰石・褐れん石・磁鉄鉱・チタン鉄鉱・黄鉄鉱を副成分鉱物として含む。石基

には文象組織がよく発達している。

e. 熊野石英閃緑岩

[産状]

山口市熊野の権現山に小規模な岩脈として分布する (Fig. 8)。岩脈の走向はNW-SEで、幅は約100m、長さは地表に現われている部分で約150mである。周防変成岩を貫き、南側はステージⅣの珪長岩岩脈に貫かれている。

[岩石記載]

本岩は暗緑灰色～優黒色を呈し、中粒で等粒状の岩石である。斜長石と角閃石を主成分鉱物とし、黒雲母・単斜輝石・斜方輝石・石英・カリ長石を伴う。斜長石は自形～半自形の新鮮な結晶 (最大径3mm) で、累帯構造がよく発達する。角閃石 (Z=褐色～褐緑色) は最大径3mmの半自形～自形結晶で、累帯構造 (コア: 褐色, リム: 褐緑色) が観察されることがある。単斜輝石は角閃石中に他形の微結晶として残存しているものが多い。角閃石と単斜輝石はアクチノ閃石化・緑泥石化が著しい。斜方輝石もすべて緑泥石と粘土鉱物の集合物からなる仮像である。黒雲母は他形～半自形で、ほとんど緑泥石に置換されているが、ときに新鮮であることもある。石英とカリ長石は他形で、他結晶間を充填し、文象組織を示す。副成分鉱物として燐灰石・ジルコン・磁鉄鉱・チタン鉄鉱が含まれる。本岩には、出葉酸性岩類と同様に、破断面が特徴的に発達し、その面に沿う細粒化や緑れん石脈の注入が認められる。

2. 新期環状岩脈

新期環状岩脈は石英斑岩、花崗斑岩および貫入性角礫岩から構成される。なお本論では、貫入性角礫岩 (intrusive breccia) の用語は、母岩に対して貫入関係を示し、角礫化した物質からなる塊を意味する記載用語 (Wright and Bowes, 1963) として用いる。

a. 石英斑岩・花崗斑岩

[産状]

本岩脈は2枚発達している。一つは、本地域西部において、出葉北方から国木峠北方にかけてN8°E方向に長さ3km・最大幅20mで発達する石英斑岩岩脈である。この岩脈は中田畑を通るN8°E方向の断層に沿って貫入している (Figs. 2, 4)。

他の一枚は本地域の北西部から北部、東部および南部にかけて極めてよく連続し、環状分布を示すものである。すなわち、小郡町・美東町境の二本木峠付近より北東へ、小郡町七曲、山口市吉敷関屋を経て荻峠まで追跡され、それ以东では榎野川断層によって北東へ約2km変位させられて、山口市古熊の善生寺付近に再び現われ、坂堂峠付近、大内矢田の面貌山東斜面、上小鯖を経て切畑まで延びている (Figs. 2, 8, 9)。切畑以西では、多量のステージⅣの石英斑岩岩脈や珪長岩岩脈の貫入のために分布が遮られ、切畑の畦倉峠北東方、山口市鑄銭司の井面山および陶に断片的に分布している。この部分では岩脈はE-W方向となる。この間の総延長は21kmに達する。この環状岩脈の幅は二本木峠～坂堂峠付近で最大180m、上小鯖と陶で約1kmである。岩脈は石英斑岩質ないしは花崗斑岩質であり、岩脈幅の狭い北西部では石英斑岩質、岩脈幅の広い北部、東部および南部では花崗斑岩質で、両者は

側方に移化している。

上記の連続性の良い環状岩脈は北西部～北部では周防変成岩中および桂ヶ岳花崗斑岩の南縁に沿って貫入している。北東部では周防変成岩と花崗岩との間に発達している。現在は消滅しているが、かつて小鯖八反田の旧金岩団地造成地 (現ナイスゴルフ262) で、本岩脈 (花崗斑岩) が花崗岩の西縁に沿って発達する葉片状カタクレサイト (foliated cataclite) を明瞭に貫いている露頭が観察された (貫入接触面の走向・傾斜: N5°W, 90°)。葉片状カタクレサイトの構造解析結果によると、西側ブロックが相対的に沈下する運動センスが得られている。南部では周南層群と花崗岩との間に貫入している。

[岩石記載]

石英斑岩は灰白色～淡褐色を呈し、斑状組織の顕著な岩石で、石英・斜長石・黒雲母・カリ長石の斑晶を含む。カリ長石はまれである。これらの斑晶は自形を呈し、大きさは石英・斜長石・カリ長石で最大5mm、黒雲母で最大2mm程度である。石英はしばしば融食形を示す。斜長石は累帯構造が顕著である。石基は微晶質で、粒径10～50μmの斜長石・カリ長石・黒雲母を主とし、燐灰石・ジルコン・不透明鉱物を伴う。一般に変質が強く、長石には絹雲母化や方解石化が認められ、黒雲母はほとんど完全に緑泥石化している。そのほか二次鉱物として、緑れん石、チタン石などが観察される。二本木峠に露出する石英斑岩には、珪長岩・石英斑岩・斜長斑岩のゼノリス (最大径約2cm) がしばしば観察される。

花崗斑岩は灰白色を呈し、斑状組織が明瞭である。斑晶として、石英・斜長石・カリ長石・黒雲母・角閃石 (±) が含まれる。石英 (最大径5mm) は一般に半自形を呈する。斜長石 (最大径3mm) は自形で、ときに角閃石の客晶を含む。また、部分的に変質して、絹雲母・方解石・緑れん石が生じている。黒雲母は大部分緑泥石化している。角閃石斑晶は東部 (上小鯖など) では岩石標本によって含まれていたりいなかったりするが、南部 (陶など) ではほぼ普遍的に出現する。角閃石はふつう3～5mm (最大径8mm) の大きさの自形～半自形結晶で、比較的新鮮である。褐色種と緑色種の両方が認められ、それぞれが単独結晶として産出することもあるが、両者はしばしば累帯構造 (コア: 褐色, リム: 緑色) を形成している。石基は微晶質であり、おもに石英・斜長石・カリ長石・黒雲母からなり、角閃石を伴うこともある。そのほか副成分鉱物として、ジルコン・燐灰石・不透明鉱物を含む。石基鉱物の粒径は50～500μmであり、石英斑岩のそれよりも大きい。また、小鯖や切畑の花崗斑岩よりも南部の陶周辺の花崗斑岩の方が粗粒な石基をもっている。山口市丸尾の花崗斑岩には暗色包有物 (細粒石英閃緑岩質) が頻繁に観察される。

b. 貫入性角礫岩

[産状]

本岩は、国木峠北方から桂ヶ岳南東方までの約7kmの間に、周防変成岩中に発達する北西に凸の形をした弧状断層に沿って貫入している (Fig. 9)。南部では連続性がよく、しかも幅も厚くて最大18mに達するが、二本木峠以北では、後述の

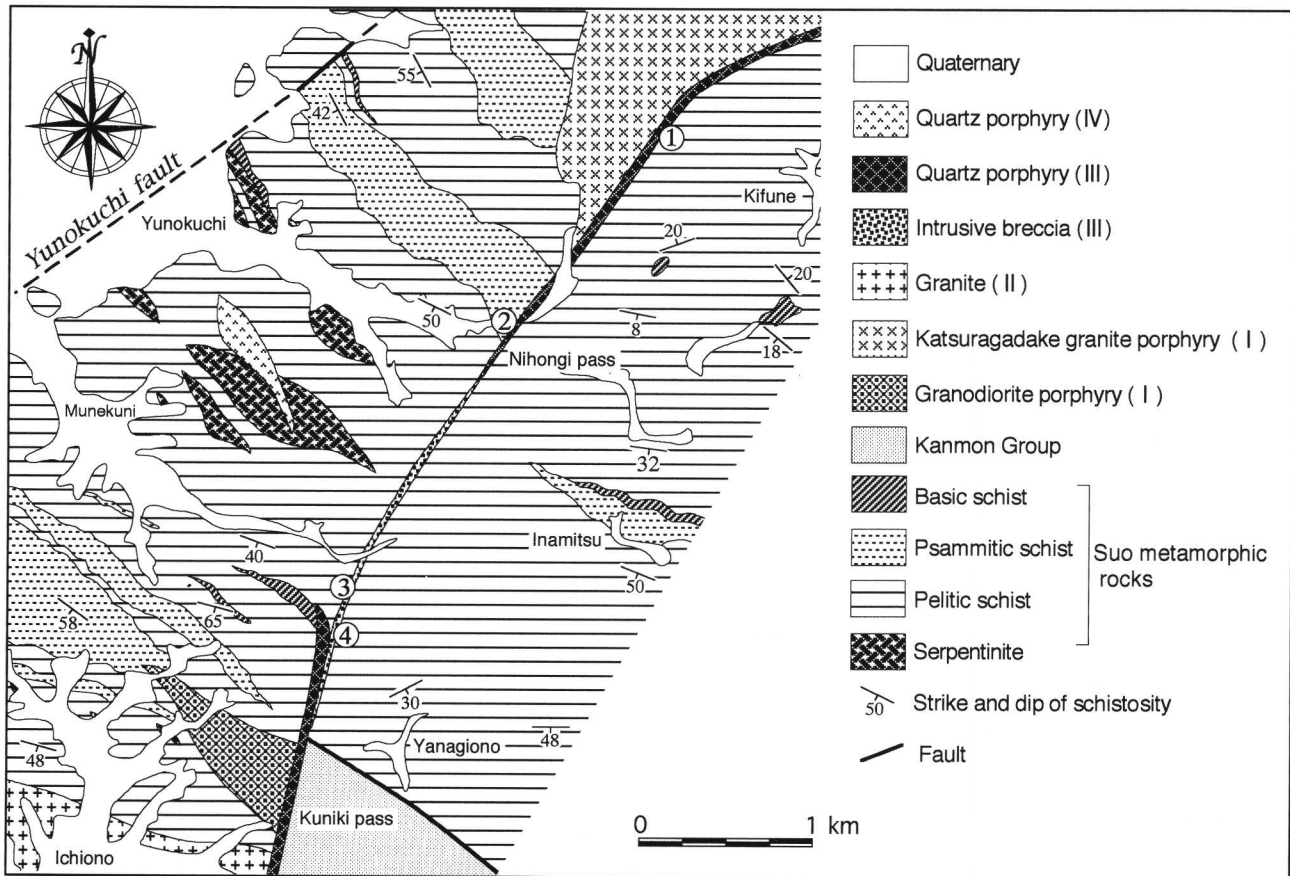


Fig. 9. Geologic map of the northwestern part of Ogori. Numbers refer to localities (1-4) mentioned in the text. Location shown in Fig. 2.

ように、新期環状岩脈に属する石英斑岩岩脈によって貫入されているために、同岩脈の周囲に幅数10cm程度で狭小に、しかも断片的に分布しているにすぎない。

Fig. 9の地質図に示した4地点、すなわち小郡町木船西北西約1 km (①地点)、二本木峠 (②地点)、旧仏坂トンネル北出口 (③地点) および旧仏坂トンネルの南西方約250 m (④地点) などに本岩の好露頭がある。それらのうち①、②および③地点の貫入性角礫岩の産状をFig. 10に示す。これらの地点では、貫入性角礫岩は周防変成岩中に発達したほぼ鉛直な断層に沿って貫入している。断層はカタクレサイト～葉片状カタクレサイトから構成されている。貫入接触面は一般に平面状(細部では細かく波打っている)であり、鉛直ないしは東側に向かって80°程度傾斜している。③地点の貫入性角礫岩の西側に発達する葉片状カタクレサイトの構造解析結果によると、東側が相対的に沈下するような運動センスが得られている。また、同地点の東側のカタクレサイト帯の東側に未固結の断層角礫岩とガウジからなる幅2.6 mの断層が観察されるが、この断層はカタクレサイト形成後の新期の断層運動によるものと考えられる。

[岩石記載]

本岩は肉眼で黒色を呈し、泥質片岩の粉体と思われる極細粒基質と、さまざまな大きさ、岩種の岩片、結晶片から構成される(Fig. 11)。基質支持礫岩で、淘汰は悪い。基質に炭酸塩鉱物が生じていることもあるが、顕著ではない。岩片はおもにカタクレサイト～ウルトラカタクレサイトの断層岩と結晶片岩類からなり、少量の珪長岩・デイサイト～流紋岩質凝灰岩・安山岩を含む。そのほか、南部に分布するものには関門層群のものと推定される頁岩・シルト岩・砂岩の岩片が相当量含まれている。これらの岩片は一般に中礫サイズまでの大きさであるが、局所的に数10 cm～1.2 mの泥質片岩のメガリスが含まれていることもある(例えば、③地点: Fig. 10-3)。岩片は一般に角ばっているが、なかには丸味を帯びたものも存在する。

カタクレサイトやウルトラカタクレサイトの岩片は結晶片岩起源のもので、通常1 cm以下の小片として普遍的に含まれている。肉眼では黒色を呈し、さまざまな程度に方解石化作用を受けている。ウルトラカタクレサイト岩片の中にウルトラカタクレサイトの岩片が含まれる breccia-in-

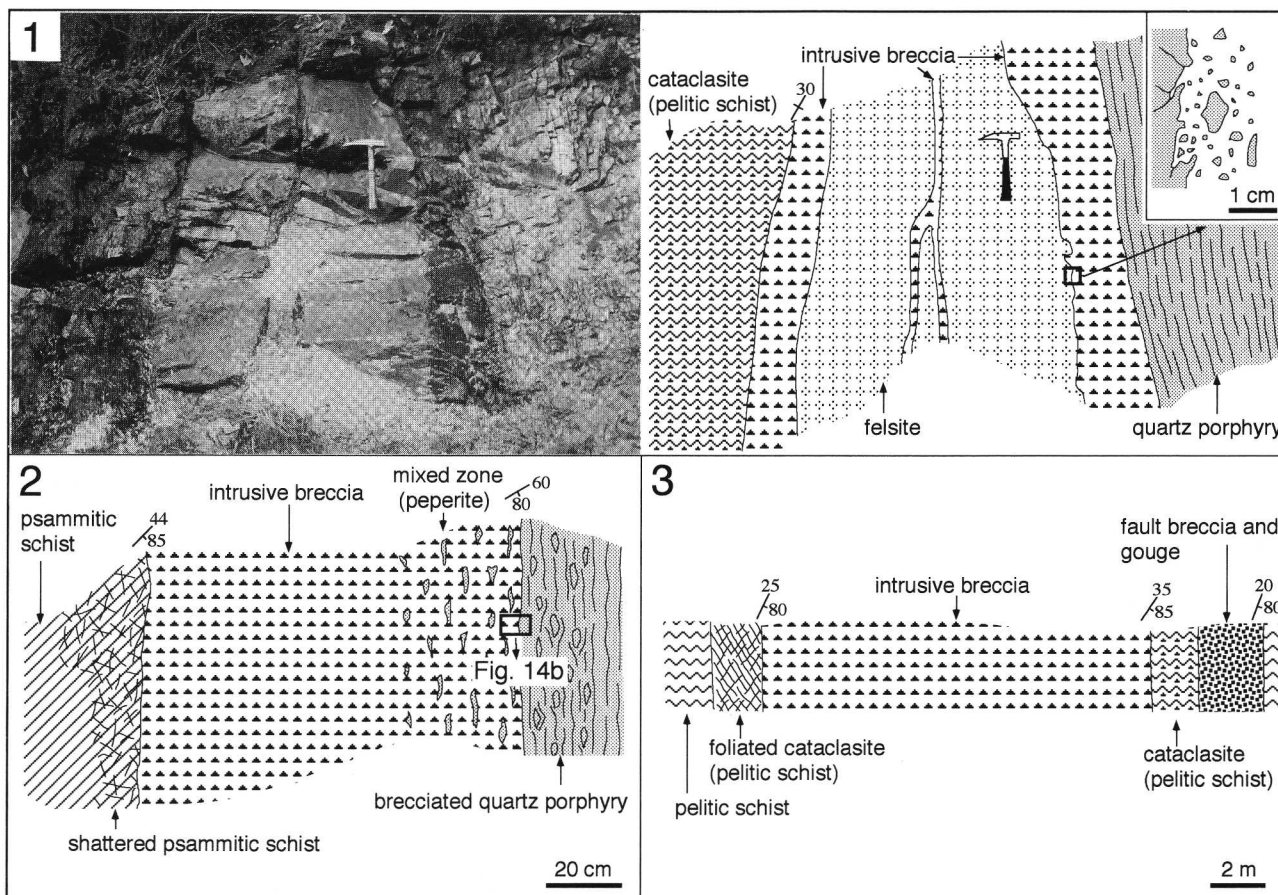


Fig. 10. Occurrences of intrusive breccia at the numbered localities (1-3) shown in Fig. 9.

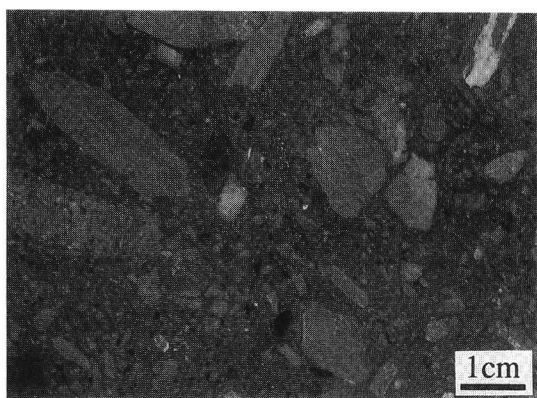


Fig. 11. Photograph of the polished slab of intrusive breccia (locality 4 in Fig. 8), showing angular clasts of schists and sedimentary rocks (Kanmon Group) set in a fine-grained matrix.

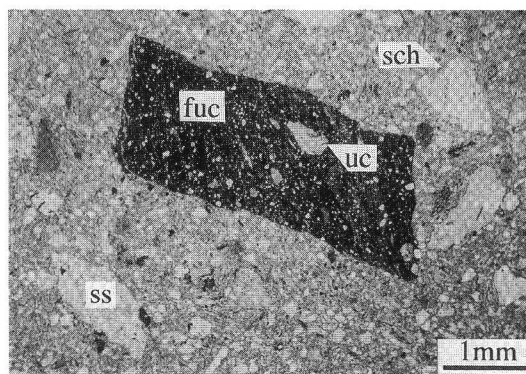


Fig. 12. Photomicrograph of breccia-in-breccia texture of intrusive breccia. Abbreviations: fuc, foliated ultracataclasite, uc; ultracataclasite, sch; schist, ss; sandstone. Plane polarized light.

breccia 組織が観察されることもある (Fig. 12). この組織は、断層岩が岩片として貫入性角礫岩に取り込まれる前に、断層運動が繰り返し起こったことを物語っている。結晶片岩岩片には、石英-方解石脈 (±緑泥石、絹雲母、曹長石、緑れん石) を含むものや、方解石化・絹雲母化・緑泥石化・黄鉄鉱化作用を受けたものがしばしば観察される。

珪長岩岩片は一般に径 2 mm 以下で、量的には少ないが、ほぼ普遍的に含まれている。②地点では、貫入性角礫岩の貫入以前に形成された岩脈の残存物とみなされる珪長岩 (幅 80 cm・長さ 1.2 m 以上) が観察される (Fig. 10-1)。この珪長岩は塊状であり、その縁部には *in situ* の破碎作用を示すジグソーパズル組織が観察され、貫入性角礫岩に移化している。また、内部には貫入性角礫岩の細脈が注入している。貫入性角礫岩に含まれる珪長岩岩片は、このような既存の岩脈に由来したものと推定される。

デイサイト質～流紋岩質凝灰岩と安山岩の岩片は極めてまれである。関門層群に由来する岩片の中には、絹雲母化・緑泥石化・黄鉄鉱化作用を受けたものが頻繁に見られる。

結晶片は石英、白雲母、方解石および緑泥石が主であり、斜長石・石墨・黄鉄鉱・磁硫鉄鉱・黄銅鉱などを伴う。これらの結晶片はおもに結晶片岩に由来したものと考えられる。方解石や緑泥石は集合体としても産するが、それらは結晶片岩中の熱水脈起源と推定される。

本岩は一般に塊状であるが、母岩との境界付近において、板状岩片の形態定向配列によるフォリエーションが境界面に平行に発達していることがある (例えば、②, ③地点)。フォリエーションをもつ標本では、鏡下で白雲母片もまた定向配列しているのが観察される。岩脈の走向に垂直な断面での岩片の組成・粒径の変化は一般に認められないが、③地点では岩片の粒径が中心部で大きく、縁部で小さい傾向がある。

c. 石英斑岩と貫入性角礫岩の関係

一般に、貫入性角礫岩に接する石英斑岩岩脈の縁部 (幅 20～80 cm) には、幅 1 mm 以下で色の異なる薄層の互層によって示されるラミネーションが発達している。ラミネーションの面は岩脈と貫入性角礫岩の境界面に平行である。①地点での観察結果によると、ラミネーションの発達する部分は、組織・構成鉱物の違いに基づき、石英斑岩岩脈の内側から縁部に向かって、(1)微晶質な石英長石質薄層と二次鉱物としての絹雲母に富む薄層の互層 (幅 0.5～7 mm) からなるゾーン I (幅 50 cm)、(2)組織・構成鉱物はゾーン I のそれとほとんど同じであるが、黒色のゼノリス (径 2 cm 以下) を含むことによって特徴づけられるゾーン II (幅 25 cm)、および(3)球顆に富む縞状部と他形の粗粒石英からなるシームの互層からなり、黒色の小さなゼノリスを含むゾーン III (幅 5 cm) から構成されている。なお、いずれのゾーンにも石英や斜長石の斑晶が含まれている。ゾーン I には絹雲母様鉱物で満たされたレンズが多数観察されるが、これはかつての気孔であったと考えられる。ゾーン II とゾーン III に含まれる黒色のゼノリスは細粒の貫入性角礫岩 (貫入性角礫岩の基質部) と判断される。ゼノリス量は縁に向かって増え、同時に形態も楕円体状からラミナ状に変化している。ラミネーションはゼノリスや石英・

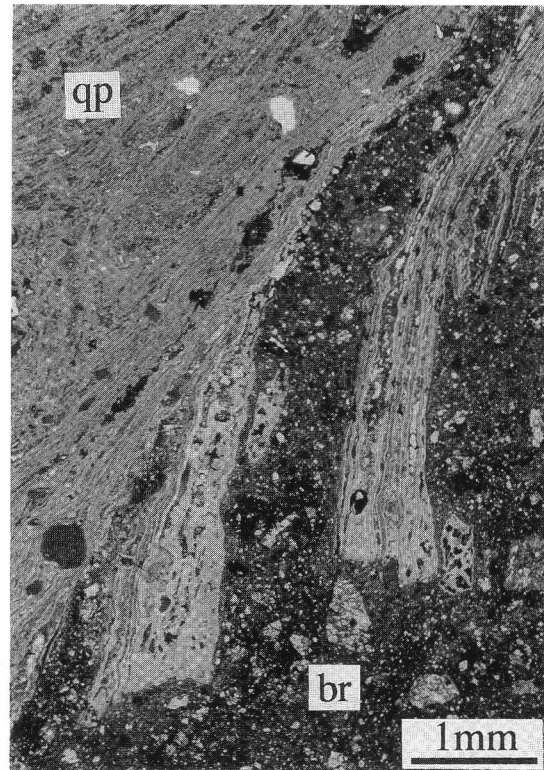


Fig. 13. Photomicrograph showing the boundary between quartz porphyry dike (qp) and intrusive breccia (br). The laminated margin of dike is splitted off along the lamination, resulting in a zigzag boundary. Flow folds can be seen within the dike margin. Plane polarized light.

斜長石斑晶の周りで湾曲していたり、流動褶曲 (flow fold) を形成している。ゾーン III と貫入性角礫岩との境界は明瞭で、大ざっぱには平面状であるが、細部ではジグザクしている (Fig. 13)。また、境界近傍 (幅数 mm) の貫入性角礫岩中には、ゾーン III と同質・同組織の石英斑岩の細長い岩片が散在している。

上記の石英斑岩周縁部に発達するラミネーションは、マグマの冷却による粘性の低下と、壁岩と上昇するマグマとの間の摩擦に起因する速度勾配によって生じた流理構造とみなされる (例えば、Christiansen and Lipman, 1966)。また、球顆は、既に述べたように、ガラスの脱ガラス化作用あるいは過冷却マグマからの結晶作用によって生成する。したがって、ラミネーションの発達している部分は急冷周縁相とみなすことができ、石英斑岩が貫入性角礫岩を貫いていることになる。ゼノリスがラミネーションに平行にラミナ状になっていたり、流動褶曲を受けていることは、それが石英斑岩に捕獲された時にまだ未固結であったことを示唆している。また、ジグザク状の境界面は急冷したガラス縁が内部の流動するマグマによって剪断を受けたためであり、貫入性角礫岩中に散在する、球顆をもつ石英斑岩の細長い岩片は切り剥がされた

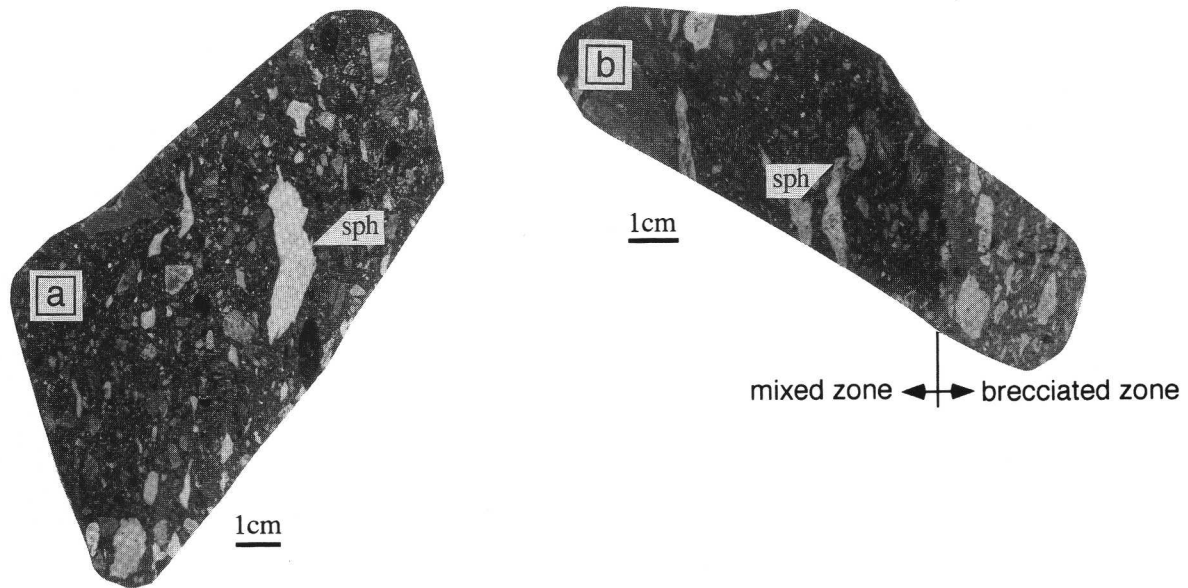


Fig. 14. Photographs of polished slab of rock from the mixed zone (a) and that from the boundary between brecciated zone of quartz porphyry and mixed zone (b). Abbreviation: sph; clast of quartz porphyry showing spherulitic texture.

ガラス縁の切片と考えられる。

②地点では、石英斑岩岩脈と貫入性角礫岩の間に特異な岩石が発達している。ここでは、流理構造をもつ石英斑岩岩脈の縁部の最外縁部が約20cmの幅で角礫化し、貫入性角礫岩との間に石英斑岩物質と貫入性角礫岩物質とが共存する混合帯（幅約40cm）が形成されている（Fig. 10b）。石英斑岩の角礫化した部分（以下、角礫化帯と呼ぶ）は微晶質な珪長質基質と顕微鏡サイズから1.5cm程度の大きさの岩片から構成される。岩片は、多数の球顆をもつ石英斑岩が主であり、微文象組織をもつ石英斑岩や細粒貫入性角礫岩が少量伴われる。一方、混合帯では、角礫化帯に含まれるものと同様の球顆をもつ石英斑岩の岩片（最大径5cm）が貫入性角礫岩物質中に分散している（Fig. 14a）。この石英斑岩岩片は肉眼で白色～灰白色を呈するためによく目立つ。角礫化帯と混合帯の境界は明瞭で、境界面は高角で傾斜している（Fig. 14b）。混合帯中の球顆をもつ石英斑岩岩片の量は境界面から遠ざかるにつれて減少し、混合帯は貫入性角礫岩に移化している。

上述の角礫化帯と混合帯に含まれる球顆をもつ石英斑岩岩片は一般に曲面で囲まれ、尖った先端を有し、全体としてoblateである。このoblate状の球顆をもつ石英斑岩岩片は形態定向配列を示し、一つのフォリエーションを形成している。両帯に発達するフォリエーションは互いに平行であり、それはまた境界面に平行でもある（Fig. 14b）。球顆をもつ石英斑岩岩片にはアメーバ状のものも観察される。鏡下では、球顆をもつ石英斑岩岩片はほとんど常に半球顆（semi-spherulite）の一重あるいは多重の皮殻と球状球顆（spherical spherulite, Lofgren, 1974）の中心部とから構成されて

いる。球顆をもつ石英斑岩岩片には、石英・方解石・緑泥石・絹雲母・緑れん石などの鉱物で充填された杏仁（最大直径4mm）をもつものや、中心部に楕円形～レンズ状（最大長径1cm）の空洞を有するリソフィーゼになっているものが観察される。あるリソフィーゼでは、空洞壁に沿って低温石英が成長しているのが観察され、水に飽和したマグマから水蒸気相が分離し、空隙を満たした水蒸気相から石英が晶出したことを示唆している。

以上において記載した角礫化帯および混合帯の岩石の成因については、後で議論することにする。

議 論

1. 溶結火山礫凝灰岩脈において高角で発達するフォリエーションの成因

中田畑の採石場にみられる溶結火山礫凝灰岩は火砕岩を噴出した火道であったと考えられる。すなわち、火道でマグマ爆発が起こり、火砕物質が火道に沿って上昇し、その多くは地表へ吹き出されたが、一部は火道内に留まったものと推測される。前述のように、この溶結火山礫凝灰岩のコンパクションフォリエーションは高角で発達している。また、溶結度（フィアメの圧密度）は南西側から北東側へ連続的に強くなる傾向が認められる。このことは高角で発達するコンパクションフォリエーションの形成に斜長斑岩は関与していないことを示している。火道を充填した溶結火砕岩における高角のフォリエーションの形成機構として、1) 爆発的噴火の末期におそらくマグマ圧の減少に対応して、高温の火砕物質で詰められた火道が閉塞し、その結果火道充填物質に水平方向の一軸

圧縮を受ける (Almond, 1971; Wolff, 1986), 2) 火道壁に火砕物質が粘着して堆積する間に, 境界層で軟らかい破片が層流状剪断 (laminar shearing) を受ける (Reedman et al., 1987), といった大きく2つの考えが提案されている。後者の場合には, 軽石片の形態は prolate になっていなければならない。本地域の溶結火山礫凝灰岩岩脈中の軽石片は oblate であることから, 高角のフォリエーションは前者の機構によって形成されたコンパクトフォリエーションと判断される。つまり, 火砕物質の噴出によって地下のマグマ溜りの圧力が低下し, 後述のような陥没が起こり, 火道が閉塞したことが原因であろう。火道内の火砕物質には温度勾配が存在し, 壁に近い側は冷却がより速く進行するために低温状態に, 中心部は高温状態に置かれたために, 溶結作用は内側でより顕著に起こったと考えられる。

2. 角礫化帯および混合帯の岩石の成因

角礫化帯および混合帯には球顆をもつ石英斑岩岩片が特徴的に含まれている。この岩片のあるものはリソフィーゼになっている。リソフィーゼは冷却の初期段階でまだ塑性変形が可能な高温ガラスの脱ガラス化作用の進行過程で形成される (McPhie et al., 1993)。したがって, 球顆をもつ石英斑岩岩片は石英斑岩質マグマのマグマ片とみなすことができよう。マグマの破碎機構には, 1) マグマ中の揮発性成分の急激な発砲によってマグマの凝集力が失われる (例えば, Verhoo-gen, 1951; Bennett, 1974など), 2) マグマと外来水との相互作用による熱収縮 (thermal contraction) によって破片化する (例えば, Carlisle, 1963; Wohletz, 1983), などが考えられる。前者の機構で流紋岩質マグマが破片化する場合には, マグマ片の形態は気孔の密度と形によって支配されるのに対して, 後者の機構による場合には, 凸面や凹面の端をもった等方状あるいは伸長したものであるのがふつうである (Heiken, 1972)。球顆をもつ石英斑岩岩片は, その形態が気孔の密度や形に支配されているようには見えず, 大部分が尖った先端をもつ伸長した形態を示していることから (Fig. 14a, b), 後者の機構によって形成されたと判断される。また, アメーバ状の石英斑岩岩片の存在はマグマの水冷による熱収縮に起因した塑性的挙動の証拠とみなすことができる。

以上のことから, 石英斑岩岩脈の縁部に発達する角礫化帯は, 内側に向かって角礫化していない流理構造の発達した石英斑岩に移化している点を考慮すると, 石英斑岩質マグマが母岩の貫入性角礫岩中に含まれていた間隙水によって冷却, 熱収縮し, *in situ* で自破碎した岩石とみなすことができる。この自破碎岩は, 堅い急冷縁が内側の流動するマグマによる dynamic stress で破壊された自破碎岩 (例えば, Pichler, 1965) とは異なる。

未固結の湿った堆積物中にマグマが貫入した場合, 境界部には急冷したマグマ片と母岩物質とが混じり合った特異な岩石が形成される。このような岩石はペペライトと呼ばれており, 玄武岩質から流紋岩質のいろいろな組成のマグマから生じ得る (例えば, Brooks et al., 1982; Kokelaar, 1982; Setterfield, 1987; Busby-Spera and White, 1987; 山元,

1987; Hanson, 1991; Hanson and Wilson, 1993など)。上述の混合帯の岩石は, 産状からみてペペライトとみなすことができる。ペペライトと角礫化帯との境界は明瞭で, 前者が後者を貫いているように見える。このことは, そのペペライトが *in situ* での生成物ではなく, 他所 (おそらく下方) から運搬されてきたものであることを示唆している。これは, 石英斑岩質マグマが未固結の貫入性角礫岩に含まれる間隙水と接触した結果, 境界部にペペライトが形成されると同時に, 水蒸気爆発が起こり, 水蒸気, マグマ破片および母岩の貫入性角礫岩物質の混合物が流動化し, 上方へ運ばれたものと考えられる。このような流動化作用はふつうペペライトの形成と関連していることが知られている (Kokelaar, 1982)。伊藤ほか (1984) は未固結の酸性凝灰岩中に貫入した安山岩脈の近傍に, 岩脈の急冷物質と母岩物質からなる混合帯を記載し, それが流動化作用によって形成されたものであることを述べているが, その混合帯の産状は本地域の場合とよく似ている。

ペペライトは局所的に, しかも狭い領域にのみ形成されている。マグマのもっている熱エネルギーが爆発の力学的エネルギーに変換される効率は, それに関与したマグマと水の質量比によって決まり, マグマ/水比が小さいほど変換効率は高いことが実験で検証されている (Wohletz and MaQueen, 1984)。断層帯といった限られた空間にマグマが貫入した場合, ペペライトの発達規模は母岩の湿り具合に大きく影響される (Setterfield, 1987)。本地域のペペライトの局所化は母岩の貫入性角礫岩の含水量が少なかったことに起因していると考えられる。ペペライトが生じるための必要条件の一つは, 母岩が未固結であることである。したがって, ペペライトの存在は, 貫入性角礫岩と石英斑岩の貫入時期に大きな時間間隙は無かったことを示唆している。

既に述べたように, 角礫化帯と混合帯に共通して含まれる球顆をもつ石英斑岩岩片は同じ方向に配列している。このことは, その配列が同じ時期に同じ機構で形成された可能性を示している。この岩片配列は, 破碎されたマグマ片がまだ温かい間に, 石英斑岩岩脈内部に継続的にマグマが注入されたことによって水平一軸圧縮を受けたために形成された可能性が高い。

3. 貫入性角礫岩の成因

貫入性角礫岩は断層に沿って貫入している。この岩石にはガラス片や軽石片などの本質物は全く含まれていない。このことは, この岩石がマグマ爆発やマグマ水蒸気爆発による生成物ではないことを強く示唆している。さらに注目すべき点は, 岩片の中に熱水脈を含むものや熱水変質・鉱化作用を蒙ったものが多く存在しているのに対して, 基質には熱水作用の影響が軽微であることである。相当量含まれている方解石片は, 母岩や周囲には石灰質岩は全く分布していないので, 母岩中に二次的に形成された熱水鉱物に由来したと考えるのが妥当である。したがって, 貫入性角礫岩の形成に先だって母岩の断層帯に熱水循環系が存在し, 主要な熱水活動の後に貫入性角礫岩が形成されたと考えられる。

本質物の欠如と古熱水系の存在を考慮すると, 貫入性角礫

岩は地下の断層沿い（深度不明）で起こった熱水爆発によって形成された熱水火道角礫岩（hydrothermal vent breccia; Nelson and Giles, 1985）である可能性が高い。熱水爆発（hydrothermal explosion）は水蒸気爆発と同義であるとする意見（例えば、Fisher and Schmincke, 1984）もあるが、前者は地下浅所で過熱水が急激に水蒸気に変化し、封岩を破壊し、固体粒子・水・水蒸気を放出するもので、爆発の駆動力としてマグマは直接関与せず、噴火エネルギーは浅熱水系の熱水と岩石内に蓄積されている点で、後者とは区別される（Muffler et al., 1971）。

熱水爆発の先駆は熱水流体の過剰圧の形成であり、自己閉塞作用（self-sealing; Facca and Tonani, 1967）はその効果的な手段と考えられている（Muffler et al., 1971; Hedenquist and Henley, 1985など）。断層帯は断層が多いため間隙率が高く、容易に地下水の通路となり得るために、マグマ溜りあるいは火道のマグマと地表との間で断層を介して大規模な熱水循環系が形成される。このような系で循環する流体から熱水鉱物（方解石、石英、曹長石、緑れん石、黄鉄鉱など）の沈澱と母岩の変質が容易に行われたと推測される。流体の通路である断層帯の断層や空隙に方解石を主とする熱水鉱物が沈殿し、圧密されることによって流体の浸透率が著しく低下し、その結果自己閉塞された帽岩より下位の熱水系に過剰圧が蓄積されたと考えられる。しかし、熱水爆発が起こるためには流体圧が岩石の引っ張り強度と静岩圧の合計より高いことが必要である。静水圧の深さに伴う上昇は静岩圧のそれに比べて緩やかなために、その条件を満たすには何か異常な条件が必要となる（Muffler et al., 1971）。

貫入性角礫岩と石英斑岩は密接な随伴関係を示し、ペペライトの存在によって示されているように、前者の形成後大きな時間間隙がなく後者が貫入している。スコットランドのRhum島のigneous complexに産する貫入性角礫岩（爆発角礫岩、explosion breccia）は、本地域の貫入性角礫岩と岩石学的性質と産状が良く似ているが、珪長岩を伴っており、珪長岩が角礫岩の後に貫入している（Hughes, 1958）。このように、貫入性角礫岩はマグマの貫入に先だてて形成されるのが一般的であるらしい（Wright and Bowes, 1963）。地下のマグマ溜りからマグマが断層帯に沿って上昇してきたことが熱水爆発のトリガーであった可能性が高い。マグマからの熱フラックスや放出されるガス・熱水によって帽岩より下位の流体圧が増大したものと考えられる（例えば、Nelson and Giles, 1985）。その圧力が岩石の引っ張り強度と静岩圧の合計を越えるレベルに達すると、水圧破碎が起こるようになる。貫入性角礫岩中の珪長岩で観察されたジグソーパズル組織は実際に母岩の断層帯内で水圧破碎が起こった証拠とみなすことができる。水圧破碎は角礫をつくり、伝播する断層の先端に生じた新たな空間に向かって流体（この場合、泥・破片を含む熱水流体）が圧力勾配に駆動されてなだれ込むことになる（中島, 1995参照）。こうして水圧破碎は破片を上方に運びことが可能で、また破片を摩擦によって丸くすることができ、貫入性角礫岩体として定置させることができる（Nairn and Wiradiradja, 1980）。しかし、幅が18mもある

ような、岩片がよく混合された基質支持角礫岩が水圧破碎だけでつくられたとは考えにくい。繰り返し発生した水圧破碎はやがて自己閉塞された帽岩を破壊したのであろう。その結果、急激な減圧によって熱水が爆発的に膨張し、瞬間的に水蒸気になる熱水爆発が起こり、水蒸気とともに破砕物は流動化し、貫入性角礫岩として定置したものと考えられる。

③地点や④地点で観察される貫入性角礫岩は関門層群起源の岩片と他の岩片とが良く混合されており、円磨された岩片も少量ではあるが存在する。このような貫入性角礫岩の存在は流動化作用（Reynolds, 1954）があったと考えるのに好都合である。この貫入性角礫岩の注目されるべき他の点は、周防変成岩分布地帯に存在する断層帯を貫いているにもかかわらず、そもそも周防変成岩を不整合に覆う地層であるはずの関門層群に由来する岩片が含まれていることである。この事実を説明する最も可能性の高い機構はFig. 15に示したようなものである。すなわち、初期状態として、周防変成岩とそれを不整合に覆う関門層群中に環状断層の一部としての高角断層が存在し、関門層群が周防変成岩の間にウエッジ状（あるいはホースとして）挟み込まれていたと想定する（Fig. 15a）。関門層群のウエッジには断層が多数発達し、またその周辺には周防変成岩と関門層群の角礫を含む断層角礫岩が形成されていたであろう。そのような部分（例えば、Fig. 15aの四角枠）が、それより下方の断層帯で発生し、上昇してきたガス-固体粒子の流動系に遭遇したために、関門層群の岩片を含む貫入性角礫岩が形成されたと推測される（Fig. 15b）。

一部の貫入性角礫岩の縁部で観察された岩片粒径の減少は流動系内でのバグノルド効果の結果であり、また母岩壁に平行な岩片の配列は流動に起因していると考えられる。

熱水爆発によって急激な圧力低下が起こり、その結果火道内に上昇していたであろう流紋岩質マグマの発砲が促進されたのであろう。発砲現象はマグマのバルク密度に大きな影響を及ぼすため、マグマ上昇の条件の一つである（例えば、風早・篠原, 1994）。マグマの発砲によってバルク密度の低下した流紋岩質マグマは浮力を獲得し、火道をさらに上昇し、既に形成されていた貫入性角礫岩中に貫入し、石英斑岩岩脈を形成したと考えられる。

4. 山口コールドロンの認定

古期および新期環状岩脈の分布で示される長径15km・短径13kmの規模の楕円形の構造は白亜紀の火成活動に関連して形成されたコールドロンであり、それらの環状岩脈はコールドロン形成によって生じた環状割れ目・断層に沿って貫入したものと考えられる。そこで、このコールドロンを山口コールドロンと呼ぶことにする。以下に認定理由を述べる。

1) 岩脈類の環状割れ目・断層に沿う貫入と内側ブロックの陥没

中田畑から嘉川にかけての地域は、後生の断層運動によるブロック化が弱く、初生の構造がみられる所であるが、東列をなす出葉酸性岩類の東方では地形的低所に周防変成岩が分布し、その上を関門層群が不整合に覆っているのに対して、西方の山地には周防変成岩が広く分布している（Fig. 4）。

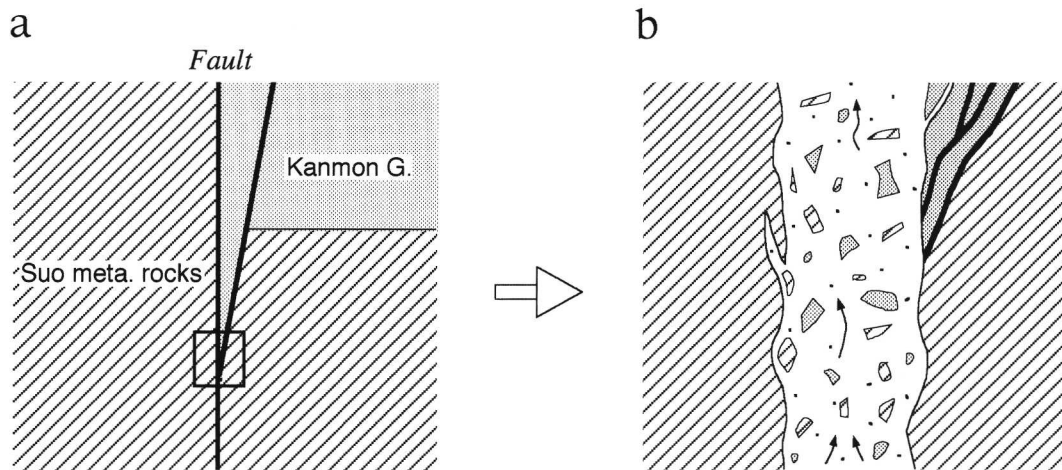


Fig. 15. Schematic diagram showing a possible mechanism for the formation of intrusive breccia containing clasts of rocks from the Kanmon Group. See text for explanation. meta; metamorphic.

この地質分布は、出葉酸性岩類の貫入している場所に、東側ブロックが相対的に沈下した正断層が存在していたことを示している。周防変成岩と関門層群の不整合面の高度をマーカーとして推算された落差は90m以上である。この地域では出葉酸性岩類が2列に並置されていることより、内側ブロックが階段状に陥没していると推測される。従来、出葉酸性岩類はNNW-SSE方向に延びる構造帯（平原岳構造帯）に沿って貫入したものであると考えられていた（村上・光田，1954；村上，1960）。しかし、出葉酸性岩類は後生の断層運動（樺野川断層）による変位を取り除くと全体として南西に凸の弧状分布を示しているため、そのような直線的な断層に沿って貫入したものでない。ほぼ同じ時代の貫入とみなされる桂ヶ岳花崗斑岩と熊野石英閃緑岩の分布を合わせると、古期環状岩脈の分布は全体として3/4円状を呈しており、古期環状岩脈はほぼ環状に発達した断層に沿って貫入したものと考えられる。

新期環状岩脈は、南西部では欠如しているものの、3/4円状の輪郭を描いている。その分布は古期環状岩脈のそれと大部分重複している。北西部から北部にかけては、新期環状岩脈は周防変成岩中に貫入しているが、どこでも岩脈の外側と内側の周防変成岩の地質構造は非調和である。Figs. 8, 9に示した地質図からもそのことを明瞭に読み取ることができるであろう。この地域の周防変成岩は、原岩岩相に基づき、上部層と下部層に区分される（武田，1986；西村ほか，1987）が、環状岩脈の内側に分布する周防変成岩は上部層に属するものであるのに対して、外側に分布するものの大半は下部層に属するものである。これらの基盤地質構造に関するデータは、新期環状岩脈の貫入位置に断層が存在していること、そして内側ブロックが相対的に落下していることを示している。実際に新期環状岩脈が断層に貫入している例は既に述べたとおりである。

新期環状岩脈より外側の周防変成岩には、大内から防府に

かけて分布する花崗岩と桂ヶ岳花崗斑岩による熱的影響が認められるのに対して、内側のものにはこれらの貫入岩体に近接した場所においてさえもそれはほとんど認められない。この接触変成帯の有無は環状岩脈より内側ブロックの落下を想定することによって合理的に説明することができる。すなわち、花崗岩質マグマ（桂ヶ岳花崗斑岩体・花崗岩体）の進入によって母岩の周防変成岩に接触変成帯が形成されたが、その後環状断層に沿って内側ブロックが落ち込んだために、上方にあった非変成部が桂ヶ岳花崗斑岩体や花崗岩体と接触するレベルまで下がったと考えられる。

山口市の泉山や赤妻には、周防変成岩の上にペルム紀層のクリップが分布している（Fig. 8；小澤，1929；吉野，1954；Kawano，1961）。湯田温泉の地下にも赤妻のクリップの延長部とみなされるペルム紀層が伏在していることがボーリング調査によって明らかにされている（高橋ほか，1960）。かつて高橋ほか（1960）は、ペルム紀層クリップが低地にあるのに、北方のより標高の高い障子岳・兄弟山・鴻ノ峯の山塊にそれが見られないのは不合理であると述べ、朝倉を通るNE-SW方向の断層を予想した。しかし、そのような断層は実在しない。それよりも、ペルム紀層クリップの分布が環状岩脈より内側に限られていることより、クリップを含む内側ブロックが落下したためにクリップが侵食・削剝を免れ、低地に残存していると解釈の方が合理的である。内側ブロックの落差を正確に決めることは困難であるが、湯田温泉地下のペルム紀層クリップが水平に重なっていると仮定し、その下底面の高度（高橋，1975のボーリングデータに基づく地質断面図から算出）と障子岳の山頂高度との比高より落差を見積もると180m以上である。

2) 内側ブロックにおける火山岩類の存在

コールドロンは火山活動に関係して形成されるため、侵食・削剝レベルが基盤岩まで達していない場合には、コールドロ

stage	magmatism	tectonism
V	emplacment of silicic magma along ring fault (quartz porphyry and granite porphyry)	second cauldron subsidence
	hydrothermal explosion along ring fault (intrusive breccia)	
IV	rhyolitic pyroclastic eruptions along ring fault (Abu Group)	
III	emplacment of granite batholith (Hiroshima granites)	first cauldron subsidence
II	emplacment of intermediate to silicic magmas along ring fault (Izuruha acid rocks, Katsuragadake granite porphyry and Kumano quartz diorite)	
I	dacitic pyroclastic eruptions along ring fractures (Shunan Group and vent-filling welded lapilli tuff)	

Fig. 16. A summary of magmatism and tectonism in the development of the Yamaguchi cauldron.

ンの内部に火山岩類が残存しているはずである。本地域には関門層群と周南層群の火山岩類および阿武層群と推定される火山岩類が分布しているが、それらの分布は環状岩脈より内側に限定されている。これらの火山岩類はかつてのカルデラ充填物であり、陥没したコールドロンの内側ブロックの火山岩類が侵食・削剝を免れ、残存していると解釈される。

3) 溶結火砕岩岩脈や貫入性角礫岩の随伴

環状岩脈には溶結火山礫凝灰岩や貫入性角礫岩の岩脈が含まれている。この種の岩脈はしばしばコールドロンの環状岩脈の一部として産する。前者はスーダンの Sabaloka cauldron (Almond, 1971), カナダの Benett Lake cauldron (Lambert, 1974), アメリカの Grizzly Peak caldera (Fridrich et al., 1991) などと報告されており、わが国では石鎚コールドロン (Yoshida, 1984; 吉田ほか, 1993) や大崩山コールドロン (Takahashi, 1986) などとみられる。また後者はスコットランドの Rhum igneous complex (Hughes, 1958; Dunham, 1968), Glen Coe cauldron (Taube-neck, 1967) などと記載されている。

5. 山口コールドロンの形成史

ここでは、環状岩脈を中心に据えて、山口コールドロンの形成史について考察する。コールドロンの形成に関与した火成活動と構造運動およびそれらの順序は Fig. 16 のようにまとめられる。

山口コールドロンは、花崗岩類（広島花崗岩類）の侵入・固結の期間を挟んだ2回の陥没によって形成されている。そこで、初期の陥没を第一次陥没、その後の陥没を第二次陥没とそれぞれ呼ぶことにする。

1) 第一次陥没

既述のように、古期環状岩脈の一つである溶結火山礫凝灰

岩は火砕物質を噴出した火道の充填物とみなされた。この溶結火山礫凝灰岩岩脈は関門層群を貫いていることから、関門層群後に形成されたと考えられる。筆者らの予察的調査によると、本地域の周南層群は陸成碎屑岩層の薄層を挟在するデイサイト質火砕岩を主体に構成されており、最上位には流紋岩質結晶凝灰岩が発達している。溶結火山礫凝灰岩岩脈はデイサイト質であり、その結晶片・岩片組成は周南層群のデイサイト質火砕岩のそれに類似している。したがって、溶結火山礫凝灰岩岩脈は周南層群のデイサイト質火砕岩を噴出した火道の一部であったと推測される。

火砕物質の噴出に引き続き、陥没が起こり、カルデラが形成された。陥没は火砕物質の噴出による地下のマグマ溜りの圧力低下が原因であったであろう。陥没によって火道が閉塞され、火道を埋めていた高温の火砕物質は水平方向の一軸圧縮を受け、高角のコンパクションフォリエーションが形成された。その後、マグマ溜りの圧力が回復し、加圧状態になり、地下の環状断層に沿って珪長質マグマが貫入し、出葉酸性岩類を形成した。なお、これまで出葉酸性岩類は関門層群後一周南層群前に位置付けられていたが (Murakami and Matsusato, 1970), 同岩類は溶結火山礫凝灰岩岩脈を貫いているので、周南層群の火成活動期の産物とみなされる。桂ヶ岳花崗斑岩と熊野石英閃緑岩もその分布・産状からこの時期に環状断層に沿って貫入したと推定されるが、出葉酸性岩類の貫入時期との前後関係は不明である。

第一次陥没は、出葉酸性岩類と母岩との貫入接触面がほぼ鉛直であることから、ビストンシリンダー状に起こったと考えられる。南西縁では階段状に陥没した。陥没に先立つ周南層群のデイサイト質火砕岩の噴出は環状割れ目に沿ったものであったと考えられる。

2) 第二次陥没

周南層群の火成活動の後、コールドロンの周りに広島花崗岩類が侵入し、固結した。その後、再度コールドロンは陥没した。環状断層はほぼ鉛直であるので、内側ブロックはピストンシリンダー状に落下したと考えられる。大部分の所で新期環状岩脈と古期環状岩脈の分布が一致していることから、この陥没は第一次陥没の断層を再活用して起こったと考えられる。南西縁では、第一次陥没壁に斜交する形で生じた。環状断層に沿ったある部分（西縁）では熱水系が形成され、熱水爆発が起こり、貫入性角礫岩が形成された。そして、引き続き珪長質マグマが環状断層に沿って上昇し、石英斑岩・花崗斑岩岩脈の新期環状岩脈を形成した。石英斑岩岩脈と母岩の湿った貫入性角礫岩との境界部には局所的に小規模なペペライトが生じた。

ところで、第二次陥没のトリガーはいったい何であったのであろうか？最も可能性が高いのは、前述した周南層群の上位に発達する流紋岩質結晶凝灰岩の噴出である。この凝灰岩は現在山頂付近に狭小に分布しているにすぎないが（Fig. 2）、それは侵食・削剝された結果であり、元来もっと広範囲に大量に分布していた可能性は十分ある。この流紋岩質火砕岩の環状断層に沿う噴出がやがてマグマ溜りの圧力低下をもたらし、陥没を引き起こしたと推測される。この推論が正しいとすれば、その流紋岩質結晶凝灰岩は周南層群の火山活動によってではなく、広島花崗岩類の侵入・固結後の火山活動によってもたらされたことになる。したがって、これまで周南層群として一括されてきた火山岩類の中には、より新期の火山活動によるものが含まれていることになる。本地域の約5 km北方には、主として流紋岩質火砕岩から構成される阿武層群が分布している。それは従来、長門峽岩体（村上・西野, 1967）と呼ばれ、火山構造性陥没体をなしていることが指摘されていた（今岡ほか, 1984）。最近、井川・今岡（1998）は長門峽岩体の層序・構造を再検討し、佐々並コールドロンなどいくつかのコールドロンが入れ子になったカルデラ複合体をなすことを明らかにしている。地理的位置や岩相の類似性より、先の流紋岩質結晶凝灰岩は阿武層群の火山活動によるものとみなすのが最も妥当である。つまり、本地域では周南層群と阿武層群の2回の不連続な火山活動がオーバーラップして起こったものと考えられる。第二次陥没は環状断層に沿う阿武層群の流紋岩質火砕岩の噴出がトリガーとなったのであろう。

3) コールドロンの地塊化と隆起・侵食

コールドロン形成後現在に至るまでに、コールドロンは榎野川断層に典型をみるNE-SW系断層などの断層運動によるブロック化や、隆起・侵食を受けた。その結果、侵食を免れたカルデラ充填物の一部と地下の環状断層に沿った火道充填物（環状岩脈）と基盤が露出し、カルデラの深部構造が現れた。

結 論

本研究によって得られた結果を要約すると、次のようである。

1. 山口地域には一つの白亜紀複合環状岩脈が発達している。この複合環状岩脈は、花崗閃緑斑岩・斜長斑岩（出葉酸性岩類）、溶結火山礫凝灰岩、桂ヶ岳花崗斑岩および熊野石英閃緑岩から構成される古期環状岩脈と、石英斑岩、花崗斑岩および貫入性角礫岩から構成される新期環状岩脈とから構成されている。貫入性角礫岩は環状断層に沿う火道内での熱水爆発によって形成された熱水火道角礫岩と考えられる。石英斑岩岩脈と貫入性角礫岩との境界部には小規模なペペライトが生じている。
2. 環状岩脈の分布によって示される楕円形の構造は白亜紀火成活動に関連したコールドロンであり、山口コールドロンと命名する。山口コールドロンは長径15km・短径13kmの規模であり、環状岩脈の内側にのみ分布する周南層群および阿武層群はカルデラ充填物の残存物である。
3. 山口コールドロンでは2回のピストンシリンダー状陥没が起こっている。古期環状岩脈と新期環状岩脈は、それぞれ第一次と第二次の陥没に対応して、地下の環状断層に沿って貫入したものである（ただし古期環状岩脈のうちの溶結火山礫凝灰岩岩脈は、陥没前の環状割れ目に沿って火砕物質を放出した火道充填物である）。
4. 第一次陥没はデイサイト質火砕岩の噴出、第二次陥没は流紋岩質火砕岩の噴出による地下のマグマ溜りの圧力低下に起因すると推測される。前者の火砕岩は周南層群に、後者のそれは阿武層群にそれぞれ対比される。この2回の陥没の間には広島花崗岩類の侵入・固結の期間が含まれている。すなわち、山口コールドロンは、同一場所で不連続に起こった火山活動によって形成されたコールドロンとみなすことができる。

お わ り に

本研究では、環状岩脈と基盤地質の野外データを基礎として、山口コールドロンの存在を明らかにし、その形成史を考察した。環状岩脈の内側に分布する白亜紀火山岩類の層序・構造や岩脈・花崗岩類の放射年代に関しては未検討である。これらのデータを合わせることによって山口コールドロンの全体像をより鮮明に描くことができるであろう。本地域のすぐ西には、山口コールドロンとほぼ同時代に形成された桜山コールドロン（中島・今岡, 1985）が、すぐ北にも佐々並コールドロン（井川・今岡, 1998）があり、広域にわたって白亜紀の周南層群および阿武層群の火山活動に関連して形成されたコールドロン群が存在している。今後、こうしたコールドロン群の形成に関与した白亜紀テクトニクスを明らかにすることも必要であろう。

謝 辞

御助言と御教示を頂き、原稿を校閲して頂いた三井金属資源開発株式会社の山田直利博士に厚くお礼申し上げます。また、本論文の発表の機会を与えて頂いた新潟大学自然科学研究科の加々美寛雄教授に感謝する。東北大学理学研究科の吉田武義博士には有益なコメントを頂いた。本研究の費用の一部は文部省科学研究費補助金（課題番号 04640706, 09640547,

代表者, 今岡照喜) を使用した. 記して当局に感謝の意を表す.

文 献

- Allen, R.L., 1988, False pyroclastic textures in altered silicic lavas, with implications for volcanic-associated mineralization. *Econ. Geol.*, **83**, 1424-1446.
- Almond, D.C., 1971, Ignimbrite vents in the Sabaloka cauldron, Sudun. *Geol. Mag.*, **108**, 159-176.
- Bennett, F.D., 1974, On volcanic ash formation. *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 648-661.
- Brooks, E.R., Wood, M.M. and Garbutt, P.L., 1982, Origin and metamorphism of peperite and associated rocks in the Devonian Elwell Formation, northern Sierra Nevada, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **93**, 1208-1231.
- Busby-Spera, C.J. and White, J.D.L., 1987, Variation in peperite textures associated with differing host-sediment properties. *Bull. Volcanol.*, **49**, 765-775.
- Carlisle, D., 1963, Pillow breccias and their aquagene tuffs, Quadra Island, British Columbia. *Jour. Geol.*, **71**, 48-71.
- Christiansen, R.L. and Lipman, P.W., 1966, Emplacement and thermal history of a rhyolite lava flow near Fortymile Canyon, southern Nevada. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **77**, 671-684.
- Dunham, A.C., 1968, The felsites, granophyre, explosion breccias and tuffites of the north-eastern margin of the Tertiary igneous complex of Rhum, Inverness-shire. *Quart. Jour. Geol. Soc. Lond.*, **123**, 327-352.
- Facca, G. and Tonani, F., 1967, The self-sealing geothermal field. *Bull. Volcanol.*, **30**, 271-273.
- Fisher, R.V. and Schmincke, H.-U., 1984, *Pyroclastic rocks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 472p.
- Fridrich, C.J., Smith, R.P., DeWitt, E.D. and McKee, E.H., 1991, Structural, eruptive, and intrusive evolution of the Grizzly Peak caldera, Sawatch Range, Colorado. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **103**, 1160-1177.
- Hanson, R.E., 1991, Quenching and hydroclastic disruption of andesitic to rhyolitic intrusions in a submarine island-arc sequence, northern Sierra Nevada, California. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **103**, 804-816.
- Hanson, R.E. and Wilson, T.J., 1993, Large-scale rhyolite peperites (Jurassic, southern Chile). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **54**, 247-264.
- 長谷 晃, 1958, 西中国・北九州の後期中生界の層序と構造. 広島大地研報, no.6, 1-50.
- Hedenquist, J.W. and Henley, R.W., 1985, Hydrothermal eruptions in the Waiotapu geothermal systems, New Zealand: their origin, associated breccias and relation to precious metal mineralization. *Econ. Geol.*, **80**, 1640-1668.
- Heiken, G., 1972, Morphology and petrography of volcanic ashes. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **83**, 1961-1988.
- Hughes, C.J., 1958, The Southern Moutains igneous complex, Isle of Rhum. *Quart. Jour. Geol. Soc.*, no.462, 111-138.
- 井川寿之・今岡照喜, 1998, 白亜紀佐々並コーールドロン: 山口県中央部の阿武層群に見出された火山性陥没構造. 日本地質学会第105年学術大会講演要旨, 158.
- 今岡照喜・上田 薫・村上允英・鈴木哲夫・脇坂安彦・甲斐野信一・横山義人・佐々木 浩, 1984, 山口県十種ヶ峰周辺の白亜紀阿武層群. 山口大教養部紀要, **18**, 79-101.
- Ishihara, S., 1971, Modal and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner zone of Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **77**, 441-452.
- 伊藤谷生・松本 良・狩野謙一・棚山雅則, 1984, マグマ貫入による未固結酸性凝灰岩及び変質流紋岩礫の溶結-伊豆半島南端部新第三紀白浜層群の例-. 地質雑, **90**, 191-205.
- Kawano, M., 1961, Stratigraphical and paleontological studies of the Paleozoic Formations in the western part of the Chugoku Massif. *Bull. Fac. Educ. Yamaguchi Univ., Mathem. Sci.*, **11**, 1-133.
- 風早康平・篠原宏志, 1994, マグマの上昇・噴火における揮発性成分の役割. 地質学論集, no.43, 53-62.
- Kobayashi, T., 1941, The Sakawa orogenic cycle and its bearing on the origin of the Japanese islands. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II*, **5**, 219-578.
- Kokelaar, B.P., 1982, Fluidization of wet sediments during the emplacement and cooling of various igneous bodies. *Jour. Geol. Soc. London*, **139**, 21-33.
- Lambert, M.B., 1974, The Bennett Lake cauldron subsidence complex, British Columbia and Yukon territory. *Geol. Surv. Can. Bull.*, no.227, 213p.
- Lofgren, G., 1971a, Experimentally produced devitrification textures in natural rhyolitic glass. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 111-123.
- Lofgren, G., 1971b, Spherulitic textures in glassy and crystalline rocks. *Jour. Geophys. Res.*, **76**, 5635-5648.
- Lofgren, G., 1974, An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization. *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 243-273.
- 松本達郎, 1951, 北九州・西中国の基盤地質構造概説. 九大理研報, 地質学, **3**, 37-48.
- McPhie, J., Doyle, M. and Allen, R., 1993, *Volcanic textures*. Centre for Ore Deposit and Exploration Studies, University of Tasmania, 198p.
- Muffler, L.J.P., White, D.E. and Truesdell, A.H., 1971, Hydrothermal explosion craters in Yellowstone National Park. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 723-740.
- 村上允英, 1959, 中国西部における広島花崗岩中の岩脈類. 岩鉱, **43**, 267-274.
- 村上允英, 1960, 中国西部における白亜紀及び第三紀火成活動. 山口大理報, **11**, 21-126.
- Murakami, N., 1974, Some problems concerning late Mesozoic to early Tertiary igneous activity on the inner side of southwest Japan. *Pacific Geol.*, no.8, 139-151.
- 村上允英・今岡照喜編, 1986, 西中国および周辺地域の酸性~中性火成活動. 山口大教養部紀要, 村上允英教授記念号, 419p.
- Murakami, N. and Matsusato, H., 1970, Intrusive volcanic breccias in the Late Mesozoic Zenjoji-yama Formation in western Chugoku and their possible relevance to the formation of cauldron structure. *Jour. Japan Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **64**, 73-94.
- 村上允英・光田 武, 1954, 山口県吉部深成岩体の研究. 山口大理学会誌, **5**, 77-100.
- 村上允英・西野英之, 1967, 中国西部における後期中生代酸性岩類の火山層序学的研究 (II), 山口大理報, **17**, 35-40.
- Nairn, I.A. and Wiradiradja, S., 1980, Late Quaternary hydrothermal explosion breccias at Kawerau geothermal field, New Zealand. *Bull. Volcanol.*, **43**, 1-13.
- 中島 司・今岡照喜, 1995, 白亜紀桜山コーールドロンの火成活動. 日本地質学会第102年学術大会講演要旨, 87.
- 中島善人, 1995, 物理的側面からみた水圧破碎の総説. 地質ニュース, no.494, 33-42.
- Nelson, C.E. and Giles, D.L., 1985, Hydrothermal eruption mechanisms and hot spring gold deposits. *Econ. Geol.*, **80**, 1633-1639.
- Nishimura, Y., 1990, "Sangun metamorphic rocks": Terrane problem. In Ichikawa, K. et al., eds., *Pre-Cretaceous Terranes of Japan*. IGCP 224, Nippon-Insatsu, Osaka, 63-79.
- 西村祐二郎・武田賢治・古田茂樹, 1987, 三郡変成岩, 山口市地域. 猪木幸男・村上允英・大久保雅弘編, 日本の地質7「中国地方」. 共立出版, 東京, 13-14.
- 小澤儀明, 1929, 7万5千分の1地質図幅徳山を讀みて其の地域の構造を解釈す. 地質雑, **36**, 507-519.
- Pichler, H., 1965, Acid hyaloclastites. *Bull. Volcanol.*, **28**, 293-310.

- Reedman, A.J., Park, K.H., Merriman, R.J. and Kim, S.E., 1987, Welded tuff infilling a volcanic vent at Weolseong, Republic of Korea. *Bull. Volcanol.*, **49**, 541-546.
- Reynolds, D.L., 1954, Fluidization as a geological process, and its bearing on the problem of intrusive granites. *Amer. Jour. Sci.*, **252**, 577-614.
- 西南日本内帯後期中生代火成活動研究グループ, 1967, 西南日本内帯における後期中生代火成活動と構造発達史. 地団研専報, no.13, 50p.
- Setterfield, T., 1987, Massive and brecciated dikes in the McDougall and Despina faults, Noranda, Quebec, Canada. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **31**, 87-97.
- 高橋英太郎, 1975, 温泉. 山口県立山口博物館編, 山口県の地質, 279-286.
- 高橋英太郎・松尾 裕・日比野至・久保田恵彬・倉田芳明, 1961, 宇部炭田東部の地質. 山口大理報, **12**, 67-74.
- 高橋英太郎・長野 博・白髪博則, 1960, 山口西北部山地の古期岩層の構造. 山口大理報, **11**, 161-164.
- Takahashi, M., 1986, Anatomy of a middle Miocene Valles-type caldera cluster: geology of the Okueyama valcano-plutonic complex, southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 33-70.
- 武田賢治, 1986, 山口市西部地域の三郡変成岩類の研究. 研究連絡紙内帯高圧変成帯, no.3, 27-29.
- Taubeneck, W.H., 1967, Notes on the Glen Coe cauldron subsidence, Argyllshire, Scotland. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **78**, 1295-1316.
- 山元孝広, 1987, 水底火山活動でのマグマの破碎プロセス—京都府丹後半島新第三紀北但層群の例—. 火山, **32**, 1-15.
- Yoshida, T., 1984, Tertiary Ishizuchi cauldron, Southwestern Japan Arc: Formation by ring fracture subsidence. *Jour. Geophys. Res.*, **89**, 8502-8510.
- 吉田武義・村田 守・山路 敦, 1993, 石鎚コールドロンの形成と中新世テクトニクス. 地質学論集, no.42, 297-349.
- 吉野言生, 1954, 山口市周縁の地質. 広島大地研報, no.4, 27-34.
- Verhoogen, J., 1951, Mechanics of ash formation. *Amer. Jour. Sci.*, **249**, 729-739.
- Wohletz, K.H., 1983, Mechanisms of hydrovolcanic pyroclast formation: grain-size, scanning electron microscopy and experimental studies. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **17**, 31-63.
- Wohletz, K.H. and McQueen, R.G., 1984, Volcanic and stratospheric dustlike particles produced by experimental water-melt interactions. *Geology*, **12**, 591-594.
- Wolff, J.A., 1986, Welded-tuff dykes, conduit closure, and lava dome growth at the end of explosive eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **28**, 379-384.
- Wright, A.E. and Bowes, D.R., 1963, Classification of volcanic breccias: a discussion. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **74**, 79-86.

(要 旨)

武田賢治・今岡照喜, 1999, 山口地域の白亜紀環状岩脈とコールドロン. 地質学論集, no.53, 199-219. (Takeda, K. and Imaoka, T., 1999, Cretaceous ring dikes and a cauldron in the Yamaguchi area, Southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no.53, 199-219.)

中国地方西部の山口地域において, 連続性の良い白亜紀環状岩脈が見いだされた. この環状岩脈は珪長質~中間質岩脈, 溶結火山礫凝灰岩岩脈および貫入性角礫岩から構成されており, 古期と新期の貫入時期の異なる岩脈の複合体である. 貫入性角礫岩は熱水火道角礫岩とみなされた. 岩脈の分布・産状と周辺地質のデータを総合的に検討した結果, 環状岩脈の分布によって示される長径15km・短径13km規模の楕円形の構造はコールドロンであると認定され, 山口コールドロンと命名された. 山口コールドロンでは2回のピストンシリンダー状の陥没が起こっており, 古期と新期の環状岩脈はそれぞれ第一次と第二次の陥没に対応して環状断層に沿って貫入したものである. 第一次陥没と第二次陥没はそれぞれ白亜紀周南層群と阿武層群の火山活動に関連して形成されたものであり, その間には広島花崗岩類の進入・固結の期間が含まれている.