

山口県後期白亜紀防府バソリスの三次元形態：地質・岩石と重力異常からの推定

Three-dimensional geometry of the Late Cretaceous Hofu batholith (Yamaguchi Prefecture, Japan) inferred from geological, petrographic, and gravity anomaly observations

Abstract

今岡照喜¹ 小室裕明²
山脇恵理香¹ 金折裕司¹
大川侑里³ 金田孝典⁴ 山本明彦⁵

*Teruyoshi Imaoka¹, Hiroaki Komuro²,
Erika Yamawaki¹, Yuji Kanaori¹,
Yuri Okawa³, Takanori Kaneda⁴ and
Akihiko Yamamoto⁵*

2012年2月2日受付.
2012年7月31日受理.

¹ 山口大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering,
Yamaguchi University, Yamaguchi 753-8512,
Japan

² 島根大学総合理工学部
Faculty of Science and Engineering, Shimane
University, Matsue 690-8504, Japan

³ 日本物理探鉱株式会社
Nippon Geophysical Prospecting Co., Ltd.
Nakaumagome 2-2-12, Ota-ku, Tokyo 143-
0027, Japan

⁴ 株式会社ミスミ
Misumi Co. Ltd., 4-1-13 Toyo, Koto-ku,
Tokyo 135-0016, Japan

⁵ 愛媛大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering,
Ehime University, Matsuyama 790-8577,
Japan

Corresponding author; T. Imaoka,
imaoka@yamaguchi-u.ac.jp

Geology, petrography, and gravity data have been used to determine the 3D geometry and emplacement mechanisms involved in the formation of the Late Cretaceous Hofu batholith. Grain size distributions and textures have been used to classify granites of the batholith into five lithofacies: coarse-, medium-, and fine-grained granites, porphyritic granite, and granodiorite. These granites are vertically stacked sheet-like bodies that were emplaced at a depth of < 2 km, as determined from their intrusive relationships with surrounding volcanic rocks.

The batholith is associated with a negative gravity anomaly, particularly the northern part of the intrusion that is bounded by the Fushinogawa–Oharako and Sabagawa faults. The batholith has an areal extent of 33 × 48 km, with the base of the batholith estimated using a gravity data inversion to be at a depth of ca. –500 to –3500 m, suggesting that the batholith is tabular. The fact that the deep parts of the batholith occur at depths of –3000 m near both faults suggests that the granite magma may have been transported along near-vertical fault-controlled conduits.

Keywords: Cretaceous batholith, gravity anomalies, magma emplacement, tabular sheet, fault, SW Japan

序 論

花崗岩は大陸地殻を特徴づける岩石であり、しばしば径数10 kmに達する巨大なバソリスを形成する。花崗岩マグマはどのようにして上昇・定置し、このように大きな花崗岩バソリスを形成する空間をつくったのであろうか。いわゆる花崗岩の空間問題はLyell(1865)による花崗岩の形成機構に関する記述以来、古くて新しい問題であり(例えば, Pitcher, 1979, 1997; Guineberteau et al., 1987; Hutton, 1988, 1996; Paterson and Fowler, 1993; Brown, 1994; 高橋, 1999; Acocella, 2000)。今なお深成岩や火山岩の研究者にとって興味がつきない問題である(Menand et al., 2011)。花崗岩マグマの地殻上部への貫入・定置機構に関しては延性的な変

形を伴うと考えられるダイアピル(diapir)やバルーンング(ballooning)、脆性的な変形を伴うストーピング(stopping)や岩脈による割れ目充填、および部分帯融解がある(Ramberg, 1970; Bateman, 1984; Schmelling et al., 1988; Marsh, 1982; Hutton, 1996; 高橋, 1997, 1999; Clemens, 1998; 安間, 2003; Yoshinobu et al., 2003; 高橋・石渡, 2012)。

西南日本内帯には、白亜紀–古第三紀に形成された火成岩類が広く分布しており(Fig. 1A)、防府バソリス(山本ほか, 2006)もその一員である(Fig. 1B)。このようなバソリスは一般に長期間にわたって活動した多くのプルトンからなる複成バソリスを形成する(例えば, Kistler et al., 1971; Pitcher, 1978, 1979; 山陰バソリス研究グループ, 1982; 西田ほか, 2005)。野外地質学、地質年代学および地球物理学的

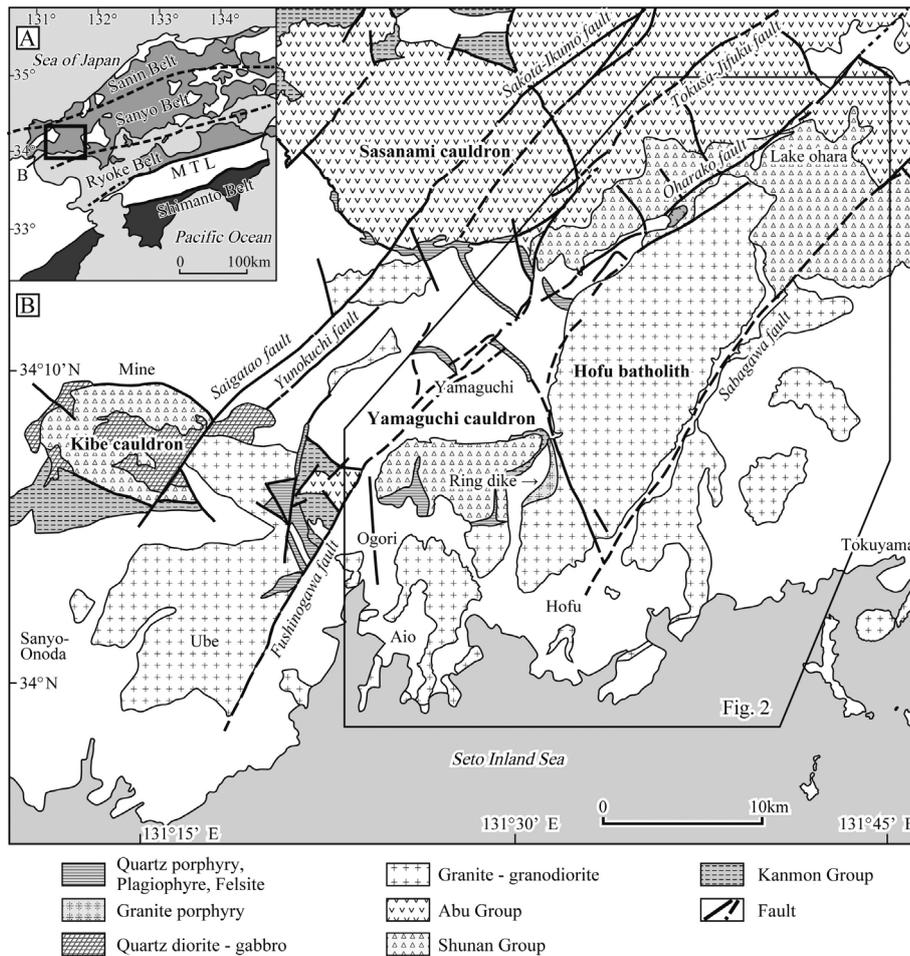


Fig. 1. (A) Map showing the distribution of Cretaceous and Paleogene igneous rocks in the Inner Zone and the Shimanto Belt of the Outer Zone of southwest Japan; modified after the 1:1,000,000 Geological Map of Japan, 3rd ed., Geological Survey of Japan (1992). (B) Simplified geological map of the central part of Yamaguchi Prefecture, indicating the location of the study area; modified after Nishimura et al. (2012).

データからは、大きく均質に見えるプル-tonは既存の大きなマグマ溜りを必要とせず、小さなマグマ・パルスが長期間にわたり継続し集積して形成されたものと考えられている (Coleman et al., 2004; Glazner et al., 2004; Annen, 2011).

このようなバソリスを形成した大規模な珪長質マグマの地殻上部への上昇・貫入・定置機構を解明するためには、バソリスを構成する花崗岩類の岩相変化や貫入関係に基づいて一つのマグマ活動の単位を明確にし、三次元的な地下構造を明らかにする必要がある。地質学的なデータだけで地下における花崗岩の形態を推定できることは稀で (Rosenberg et al., 1995), 地質学的なデータに加えて重力異常のデータによってその形態をモデル化することが有効である (Benn et al., 1990; Vigneresse, 1990; Galadí-Enríquez et al., 2003). プル-tonの形態は地殻の構造やテクトニクス場に関係するので、重力異常から推定されたプル-tonの三次元形態モデルはマグマの運搬や定置に関するテクトニクスに制約を与えることができる (加納・秋田大花崗岩研究グループ, 1978; Vigneresse, 1995a, b).

防府バソリスの分布域では、河野・古瀬(1989), 志知・山本(1994), 駒沢ほか(2000)および山本・志知(2004)によって広域重力異常図が作成されている。しかし、これらの

図に用いられている重力データは、測定間隔が数 km 単位なので詳細な地下構造を検討の上では充分でない。さらに従来、断層、とくに活断層は地形学や地震予知の観点から、花崗岩体は岩石学やマグマ活動の観点から研究の対象とされ、それぞれ別個の研究者によって独立に扱われてきた。しかし、活断層と認定されているものの活動開始時期は白亜紀に遡ることが明らかなものもある。例えば、中国地方に顕著に発達する北東-南西系の活断層のひとつである弥畝山西断層 (福塚・金折, 2002) は後期白亜紀匹見層群の火山活動に伴って形成されたグラーベン^{やうねやま}の西縁断層に対応している。この断層に沿って花崗岩が細長く貫入しており (今岡・村上, 1986), 花崗岩マグマの活動を規制している。このように花崗岩の貫入・定置機構を論じる上では両者を総合的に扱うことの重要性は論を待たない。中部地方ではそのような観点からの研究 (Kanaori, 1990; 金折ほか, 1990; 川上ほか, 1991) があるが、中国地方では研究例がない。

防府バソリスは山口県中南部に分布し、このバソリス分布地域ではいくつかの活断層が発見されてきた (金折, 2005)。そのうち、樫野川断層^{ふしのがわ}以東では以西にくらべて地形の高低差が大きく地質構造を把握しやすいので、本論文ではこの地域を研究対象とする。また本地域およびその周辺地域では、2009年7月21日の豪雨によって土石流が多発したことに

よって多くの好露頭が出現し、土石流の発生地域と花崗岩類の粒度分布との関係などを検討する機会に恵まれた(大川ほか, 2010, 2012)。そこで本研究では山口県中央部に広い分布面積を有する後期白亜紀防府バソリスを研究対象として、野外において岩相変化を追及するとともに、山本ほか(2006)の報告地域を含めて花崗岩類の産状、貫入関係、岩石記載、断層との関係および重力異常を総合的に検討した。重力異常については、防府バソリスの地下構造を詳しく検討するために、既存の観測点に加えて防府バソリス露出地域を中心に観測点を増やした。これらの検討結果に基づいて、防府バソリスの三次元形態や貫入・定置機構について議論する。

火成活動と地質の概要

1. 山口県中央部における白亜紀火成活動の概要

アジア大陸東縁に位置していた西南日本付近には、白亜紀—古第三紀にかけて弧—海溝系が発達し(Taira, 2001)、外帯では四万十帯に相当する付加体が発達し(Fig. 1A)、それと同時に内帯では活発な珪長質火成活動が行われ、大規模な珪長質火山岩やバソリス群が形成された。山口県中央部においても後期白亜紀にはカルデラ陥没を引き起こすような大規模な珪長質火成活動が行われ、周南層群の火山活動に伴って形成された吉部コールドロン(岸ほか, 2007)、環状岩脈の発達する山口コールドロン(武田・今岡, 1999)、阿武層群の火山活動に伴って形成された佐々並コールドロン(井川・今岡, 2001)が知られている(Fig. 1B)。

本論文で研究対象とする防府バソリス(防府花崗岩体)は、山口県中南部の山口市・防府市・宇部市およびその周辺町村にまたがって分布し、北西側で山口コールドロンに接する。榎野川断層以西における分布も含めると東西 48 km、南北 33 km の広がりを持つ(Fig. 1B)。地質学的には山陽帯に位置し(Fig. 1A)、イルメナイト系列の花崗岩である(Imaoka and Nakashima, 1983; Ishihara and Sasaki, 2002)。放射年代としては 95 Ma(Steiger and Jäger, 1977)の壊変定数で計算すると 97 Ma)の黒雲母 K-Ar 年代が報告されている(河野・植田, 1966)。

2. 地質分布の概要

Fig. 2 は本研究による調査結果と武田・今岡(1999)による山口コールドロン東部の調査結果をコンパイルしたものである。本調査地域(Fig. 2)の地質は古い方から錦層群、宮野層、周防変成岩、白亜紀関門層群、周南層群、阿武層群、仁保深成複合岩体、防府バソリス、花崗斑岩、石英斑岩、斜長斑岩、珪長岩およびひん岩の岩脈類、第四紀角閃石安山岩および第四系に区分される(Fig. 2)。錦層群は調査地域の北東部に小規模に分布するペルム系の地層で、周南層群に不整合で覆われる。分布域の東部では周防変成岩と断層関係にあり、西部では佐波川断層によって切られる。宮野層は調査地域北西部の宮野、仁保周辺に小規模に分布するペルム系の地層である(Kawano, 1961)。周防変成岩(Nishimura, 1998)は、トリアス紀の変成年代を示す高圧型の変成岩で、調査地域東部の大平山周辺おおひらやま、西部の山口・湯田周辺に広く分布し、大平山や山口尾では防府花崗岩体の上にルーフペンダントと

して残存する。調査地域南部では、江泊山、向島、西浦、秋穂あきほにかけて断続的に分布し、防府バソリスの南縁を画している。泥質片岩を主体とし、防府バソリスによる接触変成作用を受けている。泥質片岩には鏡下でザクロ石が見られる。調査地域の東方あるいは南方の大平山から江泊山にかけての地域に分布する泥質ホルンフェルス中には、花崗岩類との接触部にコランダムが普遍的に産出する(佐脇, 1985)。

前期白亜紀関門層群は山口コールドロン内の小鯖付近おさびに小規模に分布するにすぎない。後期白亜紀周南層群は山口コールドロン内の黒河内山付近に分布するほか、調査地域の北東部に広く分布する。北東部に分布する周南層群は物見岳層と呼称され、その積算層厚は 1,900 m と見積もられる(西野・村上, 1965)。物見岳層は防府バソリスに貫入され、接触変成作用を被っている。阿武層群は調査地域北部で周南層群を不整合で覆う。

防府花崗岩体は上記の錦層群、宮野層、周防変成岩、白亜紀関門層群、周南層群、阿武層群および仁保深成複合岩体を貫き、花崗斑岩、石英斑岩、珪長岩、斜長斑岩およびひん岩の岩脈類に貫かれる(Figs. 2, 3)。これらの岩脈のうち調査地域の西部に分布する花崗斑岩(Fig. 1B に→で示す)は、山口コールドロンの環状岩脈をなすものである。また石英斑岩、珪長岩および斜長斑岩は東西方向に卓越した配列を示す岩脈群をなしている。防府花崗岩体北東部の大原湖南部に位置する長者ヶ原には第四紀青野火山群に属する角閃石安山岩が分布し、山頂近くには爆裂火口がある(永尾, 1992, 2002)。防府から秋穂、小郡にかけての海岸沿いには第四系が広く分布する。

3. 防府花崗岩体と断層の概要

山口県中央部には北東—南西方向を示す断層、すなわち北から南への順に迫田—生雲断層とそれに連続分布するオケ峠断層、湯の口断層(武田・今岡, 1999)、徳佐—地福断層、榎野川断層およびそれと連続する北西延長上の大原湖断層(ここでは榎野川—大原湖断層と呼ぶ)、佐波川断層が“杉”型に雁行配列している(金折, 2005)。榎野川断層と佐波川断層の間には、これらとほぼ共役方向の北北西—南南東方向の小鯖断層(新称)が認められる(Fig. 1B)。

防府バソリスおよびそれに関連した貫入岩体の分布は次に示すように、榎野川—大原湖断層、佐波川断層および小鯖断層に規制されている。すなわち、①防府バソリス北西縁は榎野川—大原湖断層の南東約 1 km でこの断層に並走しており、一部で同方向の短い断層で切られる。榎野川断層に沿って、山口コールドロンの環状岩脈に約 2.5 km の左横ずれオフセットが認められる(武田・今岡, 1999)。②佐波川断層中央部ではこの断層を挟んで、北西側の防府バソリスを構成する細粒花崗岩と南西側の周防変成岩が分布する。南西部では佐波川断層の南東側だけに花崗閃緑岩の分布が認められる。断層の中北部では断層に沿って、防府バソリスの細粒花崗岩と周南層群の境界および斑状花崗岩が約 2.5 km 左横ずれオフセットしている(Fig. 2)。③小鯖断層の中～北北西延長上には環状岩脈が分布する。小鯖断層の北北西部では、断層を挟んで南南西側と北北東側にそれぞれ、周防変成岩と防府バソリス

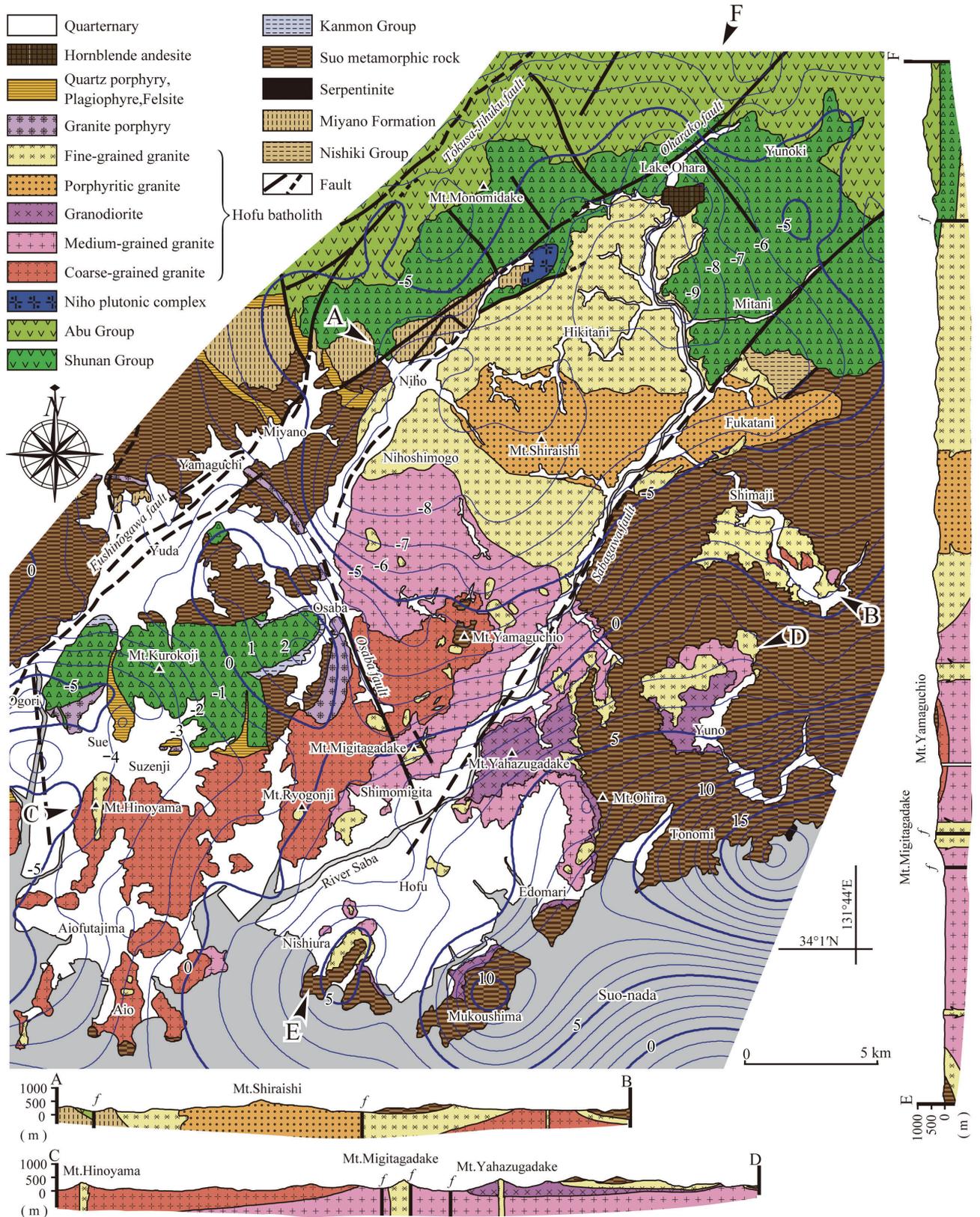


Fig. 2. Geological map and cross-sections of the Yamaguchi–Hofu district, Yamaguchi Prefecture, Japan; a superimposed residual gravity anomaly map of the Hofu batholith is also shown with 1 mgal contour intervals. The residual gravity anomaly map was band-pass filtered at wavelengths between 1 and 50 km.

リスの中粒花崗岩が分布している。一方、断層の南南東部では、防府バソリスの中粒花崗岩と粗粒花崗岩の分布に断層の影響が認められない。

徳佐—地福断層に沿って、尾根・河川の屈曲や河成段丘の変位などが認められることから、この断層は右横ずれ活断層として再活動していることが指摘されている(佐川ほか, 2008)。榎野川—大原湖断層に沿っては、山口盆地北西縁断層や下郷断層などの右横ずれ活断層が配列する(金折ほか, 2006)。佐波川断層に関しては、現在までのところ活断層であるかどうかは明らかにされていない。以上のことから、徳佐—地福断層と榎野川—大原湖断層は左横ずれ断層として形成され、その後第四紀になって右横ずれ断層として再活動している可能性が指摘される。

花崗岩類の岩相区分と産状

防府バソリスを構成する花崗岩類の岩相区分にあたっては、野外で岩相、岩質、組織、とくに主要構成鉱物の粒度や色指数の違いによる区分を試み、貫入関係も明確になってくる中でマッピング・ユニットとして粗粒花崗岩、中粒花崗岩、花崗閃緑岩、斑状花崗岩および細粒花崗岩の5タイプに区分できることが分かった(Figs. 2, 3)。防府バソリスの代表的な岩相のスラブ写真と粒度分布図をそれぞれ Fig. 4 と Fig. 5 に示す。粒度測定にあたって、ジルコンやアパタイトなど数 μ —数10 μ m 大の微細な副成分鉱物は数えず、すべての主成分鉱物の粒径だけを測定した。測定試料に関しては、粗粒花崗岩は染色した岩石スラブを用いて肉眼で測定し、中粒花崗岩と細粒花崗岩は薄片を用いて顕微鏡下で測定した。岩石スラブや薄片での測定は切断面での測定で、それぞれの鉱物の中心を通過していないことから本来の粒径とは言えず見かけの粒径である。しかし見かけの粒径も岩相相互の比較の上では意味をもつので、本稿では以下粒度あるいは粒径の表現を用いて記述する。粗粒花崗岩は、1–15 mm まで幅広い粒径分布を示し、シリイット組織をもつ(Fig. 5)。中粒花崗岩は0.5–3.5 mm にピークをもつユニモーダルな分布から等粒状組織であることがわかる。花崗閃緑岩は0.5–1.0 mm にピークをもつユニモーダルな分布を示すが、2 mm 以上の粒径を示す粒子や1 cm に近い粒径のものもある。細粒花崗岩は0.25–0.50 mm にピークをもつユニモーダルな粒径分布を示し、等粒状組織を示す。また、中粒花崗岩は粗粒花崗岩と漸移的に変化し、一部で斑状組織を示すものがある。斑状花崗岩は細粒花崗岩と違い、1.5 mm 以上の粒径を示す粒子が顕著に見られ、幅広い粒径分布から斑状組織をもつことが明らかである。

以下に各岩相の岩相・産状、分布および他岩相との貫入関係(Fig. 3)について記述する。なお、顕微鏡下での岩石記載については山本ほか(2006)も参照されたい。

1. 粗粒花崗岩

岩相: 一般に塊状・優白質である。岩相は不均質で、斑状組織・シリイット組織(Fig. 5)を示し、自形のカリ長石や斜長石の斑晶状結晶を含む(Fig. 4A)。全般的に斑状であるが、とくに楞巖寺山周辺や山口尾西方では長径1 cm 前後の自形

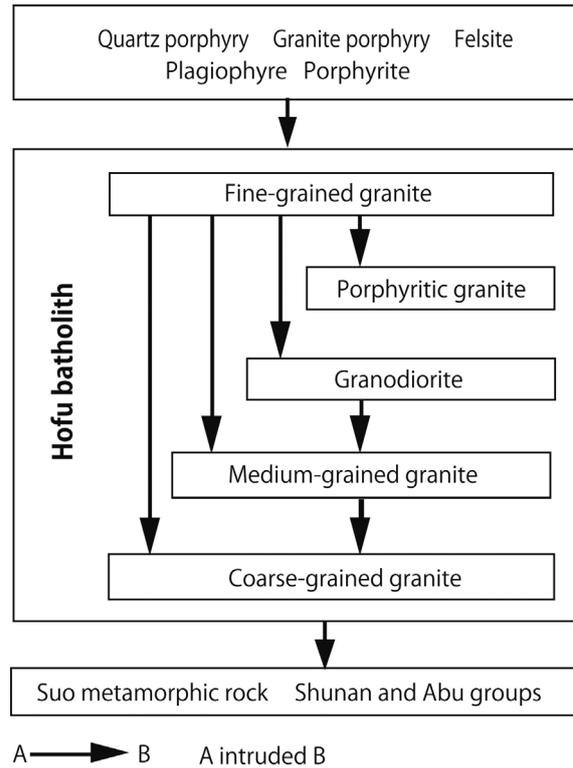


Fig. 3. Cross-cutting relationships for granitoids of the Hofu batholith; modified after Yamamoto et al. (2006).

性が強いカリ長石や斜長石の斑晶状結晶を含む斑状組織の顕著な岩相を部分的に伴うことがある。主要構成鉱物は、石英、カリ長石、斜長石および黒雲母からなり、副成分鉱物としてジルコン、アパタイト、イルメナイト、磁鉄鉱(±)および黄鉄鉱(±)が含まれる。黒雲母の粒度は珪長質鉱物に比べて小さい(Fig. 4A)。鏡下では2–4 mm 大の結晶が最も頻度分布が高い(Fig. 5)。カリ長石は淡いピンク色を呈している。ごく稀にザクロ石が見られることがあり、黒雲母に取り囲まれるような産状を示す。時に黒雲母が濃集したシュリーレンが見られることがある(Fig. 6A)。粗粒花崗岩中にはペグマタイト脈が見られることがあり、その中には刃状の黒雲母を多量に含むことがある。また石英を黒雲母が取り巻く黒雲母—石英オセリが確認できる。一部にはラパキビ長石が認められ、カリ長石の周りを自形セル状の斜長石集合体を取り囲む。同じ試料中には全体がセル状斜長石の集合体からなる長径2 cm に達する大きな斜長石も含まれる。これらの特徴は一般にマグマ混合の産物と考えられている(Hibbard, 1981)。

分布: 佐波川以西の山口尾周辺から楞巖寺山を経て南部の秋穂にかけて広く分布する。とくに南部の秋穂から鑄銭司にかけての地域に広い分布が認められ、緩やかな地形を形成している。

他岩相との関係: 秋穂の海岸露頭では周防変成岩との境界が見られ、貫入面の走向・傾斜はN70–85°W, 54–60°Sである(Fig. 6E)。

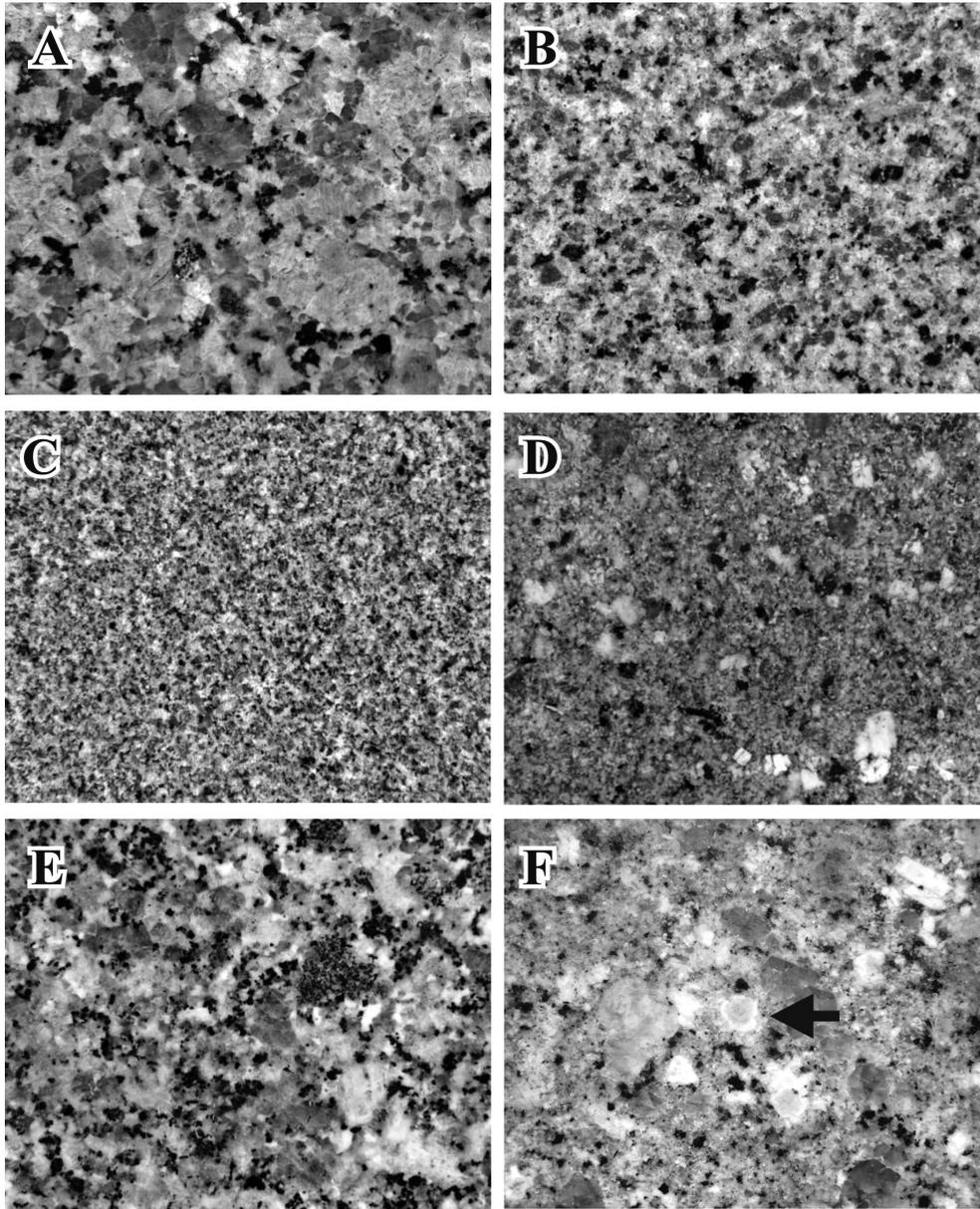


Fig. 4. Photographs of representative samples of the Hofu batholith; each photograph shows an area of slabbed sample of 6 cm width. (A) Coarse-grained granite. (B) Medium-grained granite. (C and D) Fine-grained granite, with C = equigranular facies and D = porphyritic facies. (E) Granodiorite. (F) Porphyritic granite; arrow indicates rapakivi feldspar.

2. 中粒花崗岩

岩相：主岩相は均質で、完晶質等粒状組織を示す(Fig. 4B)。前述の粗粒花崗岩とは鉱物組み合わせも同じで、構成鉱物の粒度の違い以外は良く類似する。構成鉱物の粒度は最大 5.5 mm 程度で、1.5–2.0 mm のものが全体の約 4 分の 1 を占める(Fig. 5)。一部に、地形的高所で完晶質斑状組織を示す岩相も見られるが、主岩相に漸移するので本論文では一括している。

分布：佐波川を挟んでその両側で広い分布域を示し、北は仁保下郷付近から南は防府市街地周辺まで分布する。佐波川の西部では粗粒花崗岩の分布を取り巻くように分布し、粗粒花崗岩より地形的低所に分布している(Fig. 2)。

他岩相との関係：中粒花崗岩は、粗粒花崗岩を貫いている(Fig. 3)。粗粒花崗岩と中粒花崗岩の接触部を示すスラブ写真を Fig. 6C, 6G に示す。Fig. 6C では中粒花崗岩に粗粒

花崗岩が取り込まれている。また、Fig. 6G からは粗粒花崗岩の中に中粒花崗岩が入り込んでいる様子がわかる。したがってこの部分では両者はあまり温度差がなく、流動可能な条件下で固結したと考えられる。

粗粒花崗岩と中粒花崗岩の接触部の好露頭が右田ヶ岳北方の支流(剣川)で観察される。Fig. 7A, 7B はそこで採取されたサンプルの写真を、Fig. 7C は露頭の観察結果を模式的に示したものである。ここでは上盤に粗粒花崗岩、下盤に中粒花崗岩が見られ、境界面は 15–20° 南へ緩傾斜する。境界部にはシート状のペグマタイト・アブライト・文象斑岩が発達している。ペグマタイト・アブライト・文象斑岩には石英や長石の他に針状のアクチノ閃石も多数見られる。粗粒花崗岩は径数 10 cm–1 m 大の苦鉄質火成包有岩(mafic magmatic/microgranular enclaves: MME)を含み、接触部では粒度変化が見られないが、もとの黒雲母が接触変成作用に

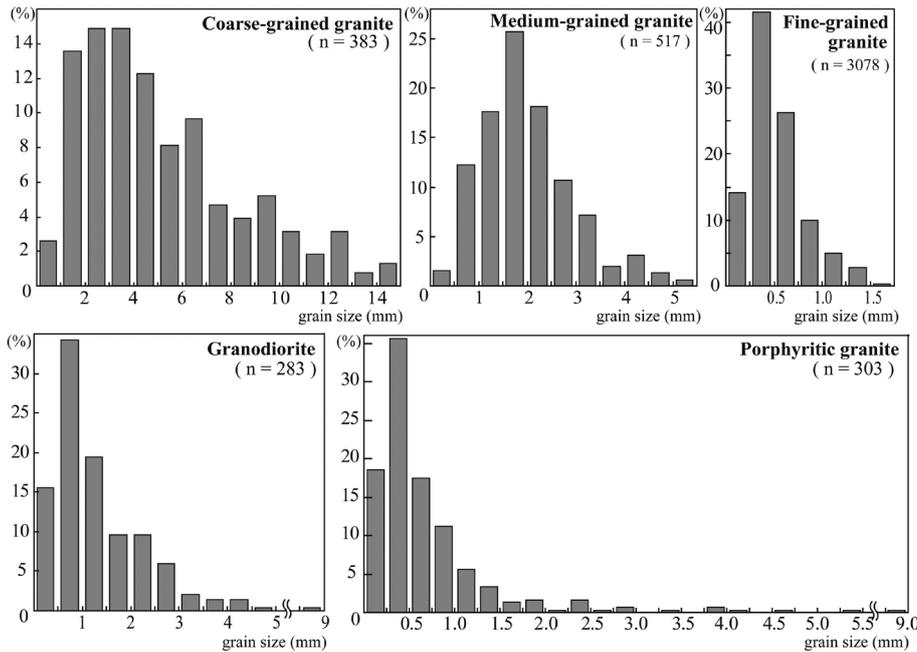


Fig. 5. Grain size frequency diagrams for representative granitic rocks of the Hofu batholith.

よって形成された繊維状黒雲母の集合体で置き換わっているのが観察される。中粒花崗岩はベグマタイト・アプライト・文象斑岩との境界部で細粒斑状となったり、有色鉱物の濃集した層を形成する。粗粒花崗岩との接触部の細粒相は急冷周縁相と見られ、中粒花崗岩は粗粒花崗岩に貫入し細粒相を伴っている。同様の接触貫入関係は、山口尾南東の沢でも見られる。上述の Fig. 6G の産状も踏まえると、中粒花崗岩として一括されたマッピング・ユニットの中には何回かのより小規模な活動が繰り返しているか、粗粒花崗岩の冷却が場所によって不均質に進行した可能性が考えられる。粗粒花崗岩の下位にベグマタイトが見られることは、貫入境界面が気相濃集の上部境界面となっていたことを示すのであろう。ベグマタイトは岩相境界だけでなく、中粒花崗岩にもしばしば観察され、Fig. 6B に示すようにシート状に産するものや、不規則な形をしているものがある。以上の観察結果から、中粒花崗岩が粗粒花崗岩に貫入していることは明白である。

3. 花崗閃緑岩

岩相：調査地域の他の花崗岩類とは苦鉄質鉱物を多量に含むことで容易に識別でき、モード組成を示す三角図では、花崗岩と花崗閃緑岩の領域にプロットされる(山本ほか, 2006)。花崗閃緑岩は不均質で、黒雲母と角閃石および不透明鉱物が濃集したクロットがしばしば確認できる(Fig. 4E)。また長径 1 cm 程度の斜長石の斑晶状結晶が特徴的に認められ、やや斑状組織を示す。主要構成鉱物は、斜長石、石英、カリ長石、黒雲母および少量の角閃石からなる。副成分鉱物としてアパタイト、ジルコン、チタン石、イルメナイトおよび黄鉄鉱(±)を含む。粒度の頻度分布図では 0.5–1.0 mm のものが最も卓越している(Fig. 5)。

分布：佐波川以東の矢筈ヶ岳周辺から大平山西斜面、さらに防府市街地南の江泊、向島の北部、西浦にかけて防府市街地を取り囲むように分布する。

他岩相との関係：防府市街地を取り囲むようにして比較的低所に分布する中粒花崗岩の上位にシート状に載っている(Fig. 2 参照)。花崗閃緑岩と中粒花崗岩との直接の接触部は確認できなかったが、①野外では両者は急激に移り変わることで、②中粒花崗岩は接触部付近においても全く岩相変化が認められないが、花崗閃緑岩は接触部付近でやや細粒となり斑晶状結晶が含まれないことから、花崗閃緑岩が中粒花崗岩の上位にシート状に貫入したものと考えられる。同様の産状は湯野地域に小規模に露出する岩体でも認められる。

4. 斑状花崗岩

岩相：粒度変化に富み、斑晶状結晶を含むことによって特徴づけられる(Fig. 4F)。斑晶状結晶としては、長径 2.5 cm に達するサーモンピンクのカリ長石や径 1 cm 程度の斜長石や融食を受けて丸くなった石英が観察される。融食を受けて丸くなったカリ長石が斜長石集合体にマントルされるラパキビ組織が認められる(Fig. 4F の矢印)。主要構成鉱物は、石英、カリ長石、斜長石、黒雲母および少量の角閃石からなり、副成分鉱物として褐簾石、ジルコン、アパタイト、磁鉄鉱およびイルメナイトを含む。粒度の頻度分布図では 1 mm 以下のものが卓越するが、2 mm 以上の結晶もかなり含まれるのが特徴である(Fig. 5)。白石山(標高 540 m)の登山道では粒度変化に富み(中粒–粗粒)、標高が高くなると粒度はやや減少し、白石山山頂付近では径 5 mm 以下の自形のカリ長石を含む斑状組織の発達した岩石が分布する。

他岩相との関係：東西方向に伸長した 14 × 4 km の岩体として貫入したもので、佐波川断層東部では周防変成岩を高角で貫き、各所で後述の細粒花崗岩に高角で貫かれている(Fig. 3)。

5. 細粒花崗岩

岩相：優白質かつ不均質である。中粒花崗岩と鉱物組み合わせは同じであるが、粒度が異なる(Fig. 5)。等粒状でアプラ

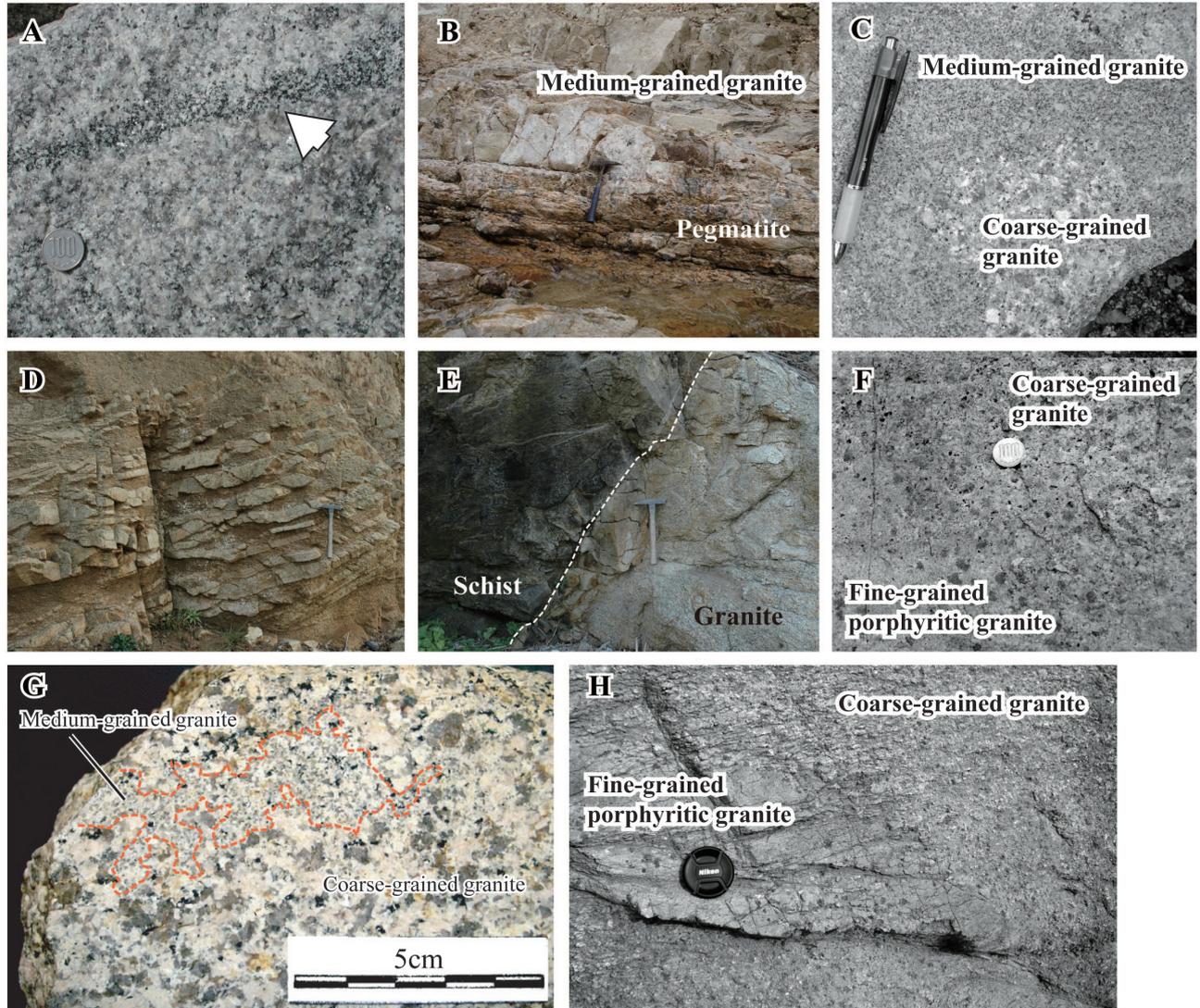


Fig. 6. Field photographs of granites within the Hofu batholith. (A) Schlieren in medium-grained granite. (B) Sheeted pegmatite in medium-grained granite. (C) Area of coarse-grained granite within medium-grained granite. (D) Banded fine-grained granite intruded into coarse-grained granite. (E) Contact relationships between pelitic schists of the Suo metamorphic rocks and coarse-grained granite. (F) Gradational boundary between coarse-grained granite and fine-grained porphyritic granite. (G) Medium-grained granite intruded into coarse-grained granite. (H) Fine-grained granite intruded into coarse-grained granite; the fine-grained granite contains xenocrystic quartz and feldspar derived from the coarse-grained granite.

イト様のもの (Fig. 4C) とやや斑状のもの (Fig. 4D) があるが、いずれも石基部は 1.75 mm 以下で細粒である (Fig. 5)。粗粒花崗岩や中粒花崗岩と比較してモードでやや石英に富む。

分布および他岩相との関係：細粒花崗岩はバソリス北部ではまとまった分布を示し、南部では径 1 km あるいはそれ以下の小岩体として各地に点在し、他のすべての岩相に貫入している。大平山西斜面では周防変成岩のルーフ直下に水平な平板状岩体として連続的に分布する。本調査域南西部にあたる火ノ山 (303.6 m) では、粗粒花崗岩に高角度で南北方向に貫入しており、その境界面は侵食に対する抵抗力の違いから地形の遷緩点となっている。また、矢筈ヶ岳 (460.9 m) でも山

頂部には花崗閃緑岩を貫く細粒花崗岩が分布しており、ここでも両者の境界は地形の遷緩点となっている。また、地質図に表現できる規模の岩体以外にも、数 m あるいは数 10 cm の小規模なものが多数認められる。その中には周囲の花崗岩類と明瞭な境界で貫入しているものもあれば、境界が不明瞭で漸移するものもあり (Fig. 6F)、秋徳二島や秋徳東では未固結の粗粒花崗岩の結晶を侵食し取り込むことによって細粒花崗岩中に斑状結晶を含むように見える斑状組織の顕著な花崗岩が認められる (Fig. 6H)。しばしばペグマタイトに伴われることもある。また、秋徳では細粒花崗岩が粗粒花崗岩中に数枚の平板状岩体として貫入している (Fig. 6D)。

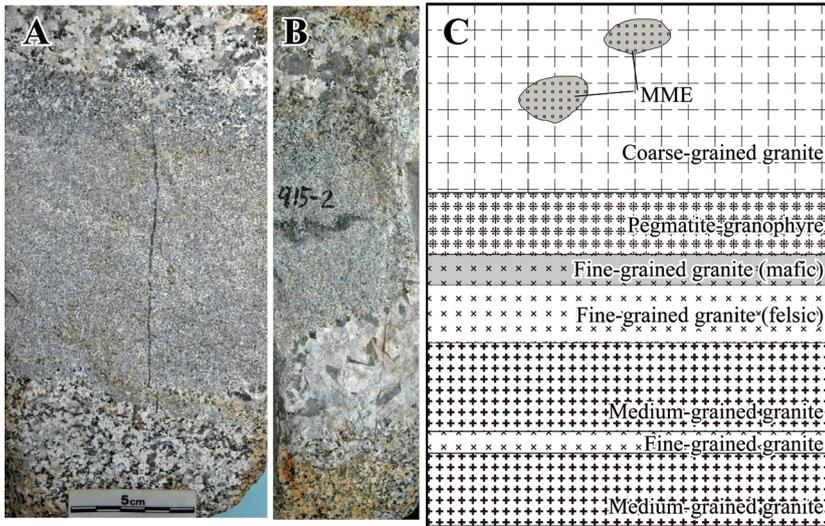


Fig. 7. Photographs (A and B) and a sketch (C) illustrating contact relationships between coarse- and medium-grained granites along the Tsurugi River; scale bar indicates 10 cm.

6. 苦鉄質火成包有岩(MME)

調査地域の花崗岩中にはMMEが含まれる。直径数10 cmの楕円形～円形MMEの肉眼観察によると、岩相は優黒質かつ細粒で、形も長径1.5–2.0 mの楕円形～円形をしたものや長径数cm–数10 cmのレンズ状のもの、さらに水平方向に伸長したもの、または数十cmの球形のものなど様々な形および大きさのものがある。さらにMMEの中には花崗岩のback veinや石英や長石のゼノクリストが見られる。粗粒花崗岩中には直径1 mを超える大型のものもしばしば見られる。主要構成鉱物は、斜長石、石英、黒雲母、角閃石(±)およびカリ長石で、カリ長石はこれらの間隙を充填する。副成分鉱物として多くの細かい針状アパタイト、磁鉄鉱(±)、イルメナイトおよび黄鉄鉱(±)を含む。

7. 貫入関係

以上のことから、岩相間の相互関係はすでにFig. 3に示したように、以下のようにまとめることができる。まず周防変成岩などの基盤岩を貫いて粗粒花崗岩が貫入した後、大きな時間間隙をおくことなく中粒花崗岩が貫入してきたと考えられる。さらにそれを花崗閃緑岩が貫き、最終的に細粒花崗岩が斑状花崗岩を含むすべての花崗岩を貫くことにより防府バソリスが形成された。これらにひん岩、石英斑岩・花崗斑岩・珪長岩および斜長斑岩の岩脈が貫入したと考えられる。岩脈の貫入順序は、まずひん岩の貫入があり、それを石英斑岩が貫く。

重力観測

1. 観測方法

重力観測は、防府バソリス分布域を含む北緯34°19'59"–34°1'56"、東経131°22'30"–131°45'0"の範囲、つまり国土地理院発行1/25,000地形図では大原湖、佐々並、野島、竹島の範囲で行った(Fig. 8)。また、本研究(島根大学と山口大学)で新規に設けた観測点は128ポイントであるが、これに既存の測定データである島根大学の観測点185ポイント(Shichi and Yamamoto, 2001)、地質調査所の観測点41

ポイントおよび金属鉱業事業団の観測点96ポイント(地質調査所編, 2000)を加えた観測点の位置をFig. 8に示す。新規の観測点と既存の観測点は、同一の方法による補正(地形補正・ブーゲー補正など)を行って規格化されているが、さらにx–y方向についてブーゲー異常値の2階微分を求めることによってバグデータをチェックした。2階微分でバグを発見する方法は萩原・糸田(2001)による。

観測にはラコスト重力計G1034(LaCoste and Romberg社製)を使用した。観測点の位置決定には、国土地理院発行の1/25,000の地形図、山口県発行の1/5,000の森林基本図、および防府市発行の1/10,000都市計画図を用いた。重力測定に大きな影響を与える標高値についてはこれらの地形図から読み取り、三角点、水準点および独立標高点、標高値の記載されている地点を選んだ。なお、観測点の位置を地形図から読み取る方法は、汎地球測位システム(GPS)測地や水準測量を併用する方法に比べれば精度が落ちると思われがちであるが、検証によって1 mGalの総合精度が保証されている(志知・山本, 1994)。本研究の観測で用いた絶対重力値は、松江FGS(島根大学キャンパス内に設置)の値979,794.854 mGalである。また重力潮汐の計算には中井(1979)を利用した。

2. 観測結果

Fig. 8に調査地域におけるブーゲー重力異常の観測結果を示す。花崗岩体を主たる対象にしているため、ブーゲー重力異常を求める際の仮定密度は $2.67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とした。北東部に長波長の–15 mGalに達する負の重力異常域が広く認められ、これを取り囲むように西～南側に正の重力異常域が分布する。この重力異常分布図では、防府バソリスの構造が必ずしも明瞭に反映されているとはいえず、このような長波長の重力異常には防府バソリスに起因する局所的な重力異常が埋もれている可能性がある。Fig. 8のブーゲー重力異常図に見られる長波長は、調査地域全体で1波長分の成分がありそうなので、波長60 km以上のローカットフィルターと波長50 km–1 kmのバンドパスフィルター、および

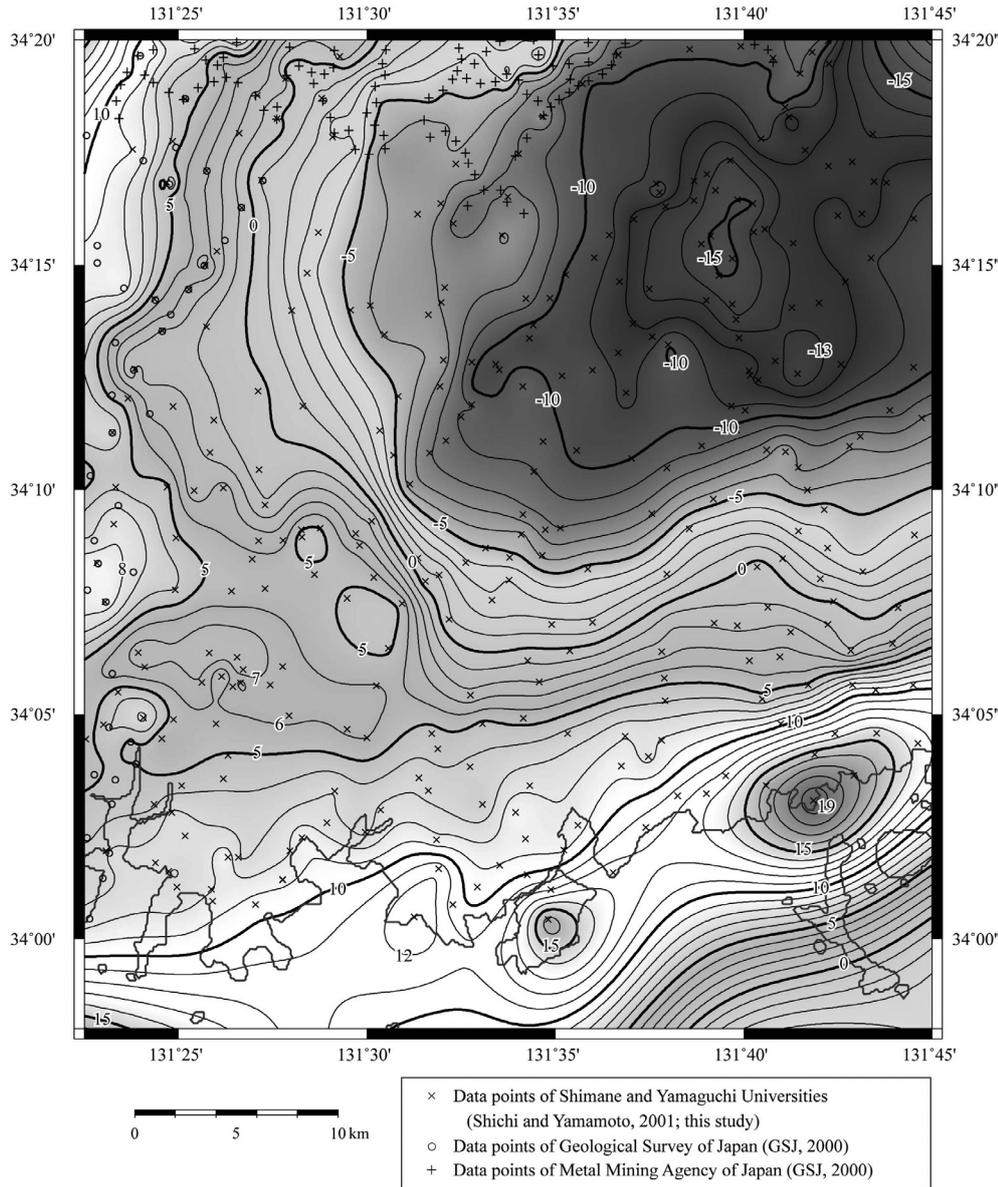


Fig. 8. Bouguer gravity anomaly map of the Yamaguchi-Hofu district, Yamaguchi Prefecture, Japan; gravity data shown at 1 mgal contour intervals.

地表付近の密度のばらつきに起因するノイズ除去のための波長 900 m 以下のハイカットフィルターをかけた残差重力異常を調査地域の地質図に重ね合わせて Fig. 2 に示す。

考 察

1. 地質と重力異常との関係

ここでは、防府バソリスの地質と重力異常の関係について考察する。まず、フィルタリング処理前のブーゲー重力異常図 (Fig. 8) と、残差重力異常図 (Fig. 2) を比較すると、後者には防府バソリスに起因する局所的な負の重力異常が明瞭に現れている。すなわち地質図に示された防府バソリスの分布にほぼ一致するように、周囲よりも 5~7 mGal ほど低い負の重力異常域が認められる。この負の重力異常域は、底の平坦な鍋底のような型である。このような形状は、防府バソリスを構成する岩石の密度が均質で、下底面がほぼ一定の深度にある、いわゆる平板状の岩体であることを示唆する。

山口から小鯖にかけてフィルター処理前のブーゲー重力異常では不明瞭であったが、残差重力異常図に陥没壁に沿った円弧状の負の重力異常帯が認められる。これは環状岩脈をなす花崗斑岩の分布で示される山口コールドロンの輪郭に一致している。一般に、負の重力異常域を示すコールドロンは、地表のカルデラ陥没域を低密度の火山岩類が埋積している場合が多い (例えば、小室ほか, 2002)。しかし、山口コールドロンには南部を除き、埋積する火山岩類がほとんど分布しないので、この低重力異常帯は地表のカルデラ陥没とそれを埋積する火山岩類を反映したものではないと判断される。地質学的に指摘されたコールドロンの輪郭に負の重力異常帯が沿っていることは、underground cauldron subsidence (Billings, 1943) のような構造が存在し、低密度の深成岩体が基盤を置換しながら貫入したことを示唆している。

防府バソリス中東部に見られる -5 mGal の等値線は、佐波川断層付近で断層に切られる部分やその北方でのバソリス

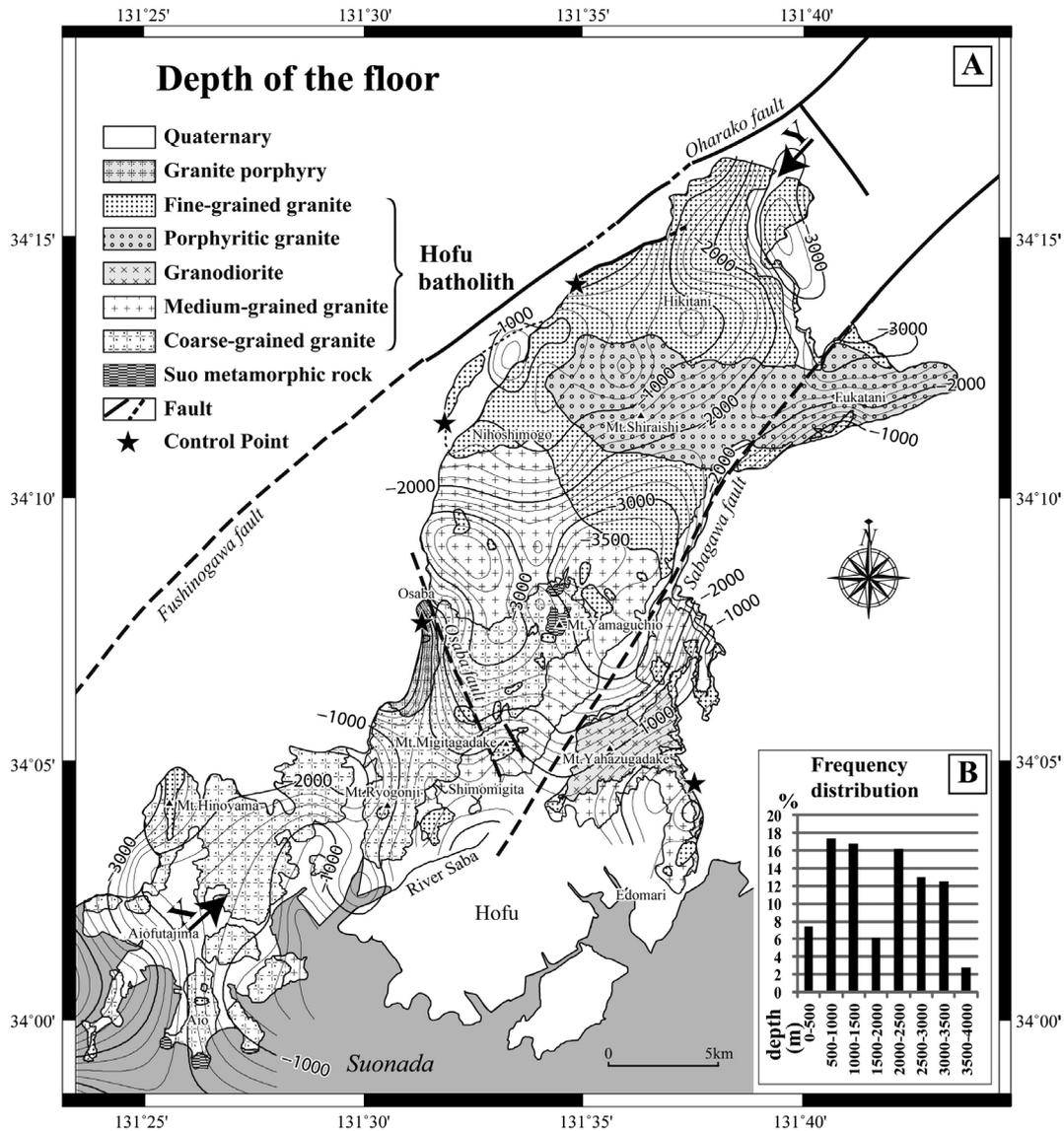


Fig. 9. Three-dimensional geometry of the Hofu batholith. (A) Depth contours (contour interval = 250 m) of the batholith floor were calculated from a gravity inversion undertaken using the method of Komazawa (1984); contours show the distance (in m) above sea level (ASL), with ★ = point of known elevation. The density difference between the pluton and basement rocks is assumed to be $0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, with areas of topographic relief over 500 m ASL masked, as the area outside the pluton is not considered within this study, and the margin of the pluton is approximately consistent with a contour line of 500 m ASL. (B) Depth frequency distribution (in m) of the Hofu batholith.

の表層分布に調和的であるのに対して、南東部での -5 から $+7 \text{ mGal}$ の等値線はバソリスの地表分布と斜交する(Fig. 2)。このことは、中東部において本バソリスが急傾斜で周防変成岩と接すること、南東部においては周防変成岩と緩傾斜で接し高地や湯野の小岩体に連続することと調和的である。

防府市～新南陽市にかけての瀬戸内海沿岸に、 $+5 \sim +15 \text{ mGal}$ に達する高重力異常帯が残差重力異常図に認められる。これは、富海東方で周防変成岩中に貫入する蛇紋岩体の分布とよく一致しているので、高密度の超苦鉄質岩体(蛇紋岩体)によるものと考えられる。

断層の位置と重力異常の関係に注目して残差重力異常図

(Fig. 2)をみると、 -7 mGal のコンターは榎野川-大原湖断層の北西半分にはほぼ沿っており、佐波川断層北西半分とやや斜交する。また、 -8 mGal 以下の領域はこの2断層の間だけに限定される。このことは、防府バソリスの地下構造がこれら2断層に支配されていることを示唆している。さらに、小鱗断層北部をはさんで重力異常の急勾配が認められるので、この断層も防府バソリスの地下構造を規制している可能性がある。

2. 防府バソリスの三次元構造

防府バソリスの中心部で基盤に達する既存のボーリングデータはないので、このバソリスの三次元構造、とくにバソリスの下底面の深度は直接には分かっていない。さらに重力

異常からバソリスの基盤深度(厚さ)を一意的に求めることはできない。一方で低重力異常域は防府バソリスの分布とよく一致している。このことは、本地域の低重力異常が、周囲の母岩に比べて相対的に低密度の防府バソリスに起因することを強く示唆する。そこで、防府花崗岩体と母岩との密度差を $0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度と仮定し、駒澤(1984)の方法による三次元二層構造の構造解析(モデル計算)を行って、岩体底部の深度を見積もった。密度差を $0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ としたのは、日本の花崗岩の平均密度が約 $2.633 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、結晶片岩の平均密度が約 $2.748 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とされる(村田ほか, 1991)ことによる。駒澤(1984)の方法は、花崗岩と基盤の密度差をもった角柱の集合体で基盤起伏(バソリス下底面)の形を近似し、反復修正法によって角柱頂部の位置を決定するものである。基盤岩類は周防変成岩の結晶片岩や周南層群などからなるが、主体は其中で最も広い分布域を有する結晶片岩であるとみなして、解析では防府バソリスと結晶片岩の2層構造とした。構造解析はコントロールポイントとして選り出された数点のバソリス縁辺の基盤との境界を与えて行い、花崗岩が連続して広く集中分布する地域についてだけ行った。

構造解析の結果を Fig. 9 に示す。コンターは花崗岩体とその下部に分布する基盤との境界の標高であり、防府バソリスの下底面を意味する。解析条件とした基盤との密度差 $0.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ のときに、バソリスの下底面は多くの地域で標高 $-500 \sim -3,500 \text{ m}$ にあり(Fig. 9A), $-500 \sim -1,500 \text{ m}$ の部分が全体の34%, $-2,000 \sim -3,500 \text{ m}$ の部分が42%を占める(Fig. 9B)。バソリス下底面の平均深度は $1,840 \text{ m}$ であると見積もられる。Fig. 9A の中央部にあたる小鱈断層付近、山口尾から佐波川断層にかけての領域、岩体北部の深谷北方の小鱈断層付近、および岩体北部の引谷北方の大原湖断層やそれに直交する断層の近傍には $-3,000 \text{ m}$ を超えるところがみられる。このうち小鱈断層付近の $-3,000 \text{ m}$ 以深のエリアは山口コールドロンの環状岩脈をとり囲むように分布している。また山口尾(標高 486.7 m)には周防変成岩のルーフペンダントが見られ、その部分の下底面は約 $-3,000 \text{ m}$ であるので花崗岩の最大の厚さはおよそ $3,500 \text{ m}$ と推定される。このようなバソリスの下底面の深度が周辺に比べて異常に深い部分はいずれも断層近傍に見られることから、断層に沿って断裂が深部にまで続いており、本バソリスを形成した花崗岩マグマの供給口であった可能性が高い。

重力異常から解析された防府バソリスの北北東-南南西方向の断面図を Fig. 10A に示す。本バソリスは全体として薄い平板状の構造を示すことが明らかである。バソリスは調査範囲内だけでも北東-南西方向に 48 km 、東西方向に 30 km 以上広がり(Fig. 2 参照)、その厚さは最大でも $3,500 \text{ m}$ と見積もられるので全体として $10:1$ 以上のアスペクト比を有する薄いシートと言える。防府バソリス南部の佐波川以西では粗粒花崗岩の下位に中粒花崗岩のシートが貫き(under-accretion)、佐波川以东では中粒花崗岩の上位に花崗閃緑岩、さらにその上位に細粒花崗岩のシートが貫いているので(over-accretion)、何枚かのシートが重なり合っ上下方向

に成長していったシート状複合体(sheeted complex)を形成していることになる。アナログ実験によると岩脈からシルへの転換は母岩の剛性(rigidity)の違いに依存し、シルは相対的に剛性の大きなレーヤー(上盤)と小さいレーヤー(下盤)の境界に貫入する(Kavanagh et al., 2006)。シルは一度固結するとその上下のレーヤーで剛性の違いを生じる可能性があり、固結したシルがその下のレーヤーより剛性が大きければ次のシルはその下部に貫入し、下のレーヤーより剛性が小さければ次のシルはその上部に貫入することになる。いずれも固結したシルが次のシルの定置に都合の良い場所を提供する(Menand, 2008, 2011; Miller et al., 2011)。中粒花崗岩は粗粒花崗岩の下部に貫入しているの、粗粒花崗岩が剛性の大きいレーヤーをなしていたと推定される。一方で花崗閃緑岩は中粒花崗岩の上部に貫入してきたので、中粒花崗岩はさらに上位にあった周防変成岩より剛性が小さく、中粒花崗岩の貫入位置が花崗閃緑岩の定置に制約を与えた可能性がある。最後に最大層厚 110 m の細粒花崗岩のシートが周防変成岩と花崗閃緑岩の間(ルーフ直下)に貫入してくるが、母岩であった周防変成岩は何度も花崗岩に貫入されたためにホルンフェルス化して剛性を増していったと思われる。山陽帯の花崗岩類ではしばしば中・古生界のルーフ直下にシル状の細粒花崗岩が観察される(例えば、高橋ほか, 1989; 高橋, 1991)が、ホルンフェルス化した中・古生界が剛性の大きなキャップロックとなっていた可能性が高い。シルの定置は剛性のみならずレオロジーや地殻内の応力にも支配される(Menand, 2008)。いずれにしても何枚ものシルが積み重なることで厚さを増してラコリスとなり、厚さのみでなく水平方向にも広がりを増してプルトンそしてバソリスへと成長していく(sheet-on-sheet モデル; Menand, 2008 参照)。

防府バソリス南部におけるバソリスの形成過程は、sheet-on-sheet モデルで説明することができる。ここで明らかとなったようなシルの積み重なりによって形成されたプルトンについては、北米ユタ州の Henry Mountains の漸新世花崗岩(Morgan et al., 2008; de Saint-Blanquat et al., 2006; Horsman et al., 2010)、南米パタゴニアの中新世 Paine 花崗岩(Michel et al., 2008)、北米カリフォルニア州 Chemehuevi Mountains の後期白亜紀深成岩体(John, 1988)、イタリア・エルバ島の Monte Capanne プルトン(Farina et al., 2010)などで多くの好例が知られている。最後の例では、平板状花崗岩の下に供給岩脈が復元されている。

一方で中粒花崗岩や粗粒花崗岩には多くの細粒花崗岩の小岩体の貫入が認められる。したがって、防府バソリスのシートの内部構造は何枚かのシートとそれに貫入する大小(径 3 km 以下)の岩脈との複合体から構成されていると考えられる。かくして小規模なマグマ活動のパルスによってプルトンが成長していくとする考えは、大規模なマグマ溜りの定置よりも定置空間をつくりやすいので現実味があり、空間問題が解消しやすい(Petford et al., 2000; Saint Blanquat et al., 2011)。

Fig. 10B-I には重力異常から解析された世界のいくつかの花崗岩地域の断面図を示す。いずれも同じスケールで縦横

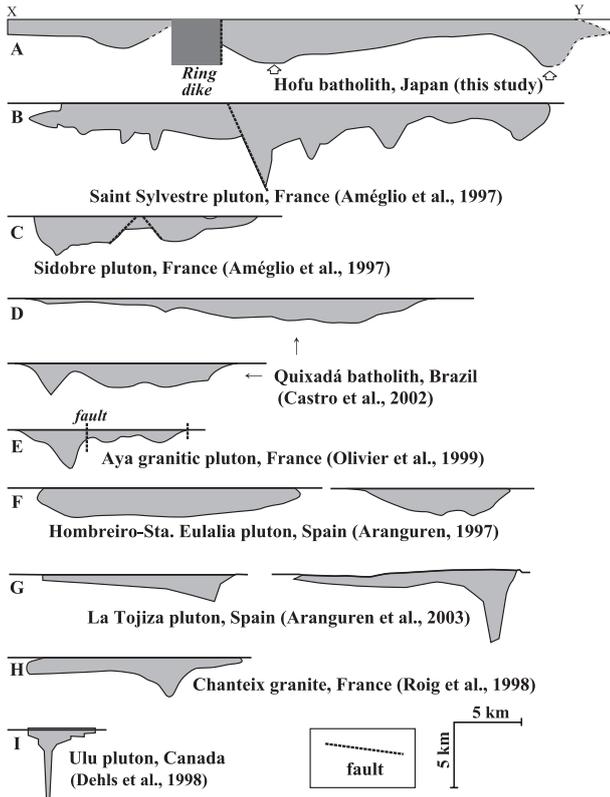


Fig. 10. Global examples of the shape of pluton floors calculated using gravity inversions; shapes shown with no vertical exaggeration. (A) Schematic cross-section of the Hofu batholith along the profiles shown in Fig. 9A (this study). (B) Saint Sylvestre pluton, France (Améglio et al., 1997). (C) Sidobre pluton, France (Améglio et al., 1997). (D) Quixadá batholith, central Ceará domain, NE Brazil (de Castro et al., 2002). (E) Aya granitic pluton, Basque Pyrenees, France (Olivier et al., 1999). (F) Hombreiro-Sta. Eulalia pluton, NW Spain (Aranguren, 1997). (G) La Tojiza pluton, NW Spain (Aranguren et al., 2003). (H) Chanteix granite, France (Roig et al., 1998). (I) Ulu pluton, northern Slave Province, Canada (Dehls et al., 1998).

比 = 1 : 1 で示している。花崗岩の厚さはいずれのモデル断面でも 2–6 km となっている。防府バソリスの厚さに関する上記の見積もりは、このようなよく解析された平板状の花崗岩体で厚さが 3 km 以下と推定されていること (Vigneresse, 1995b; McCaffrey and Petford, 1997; Cruden, 1998, 2006; Dehls et al., 1998) から妥当と思われる。

3. 防府バソリスの形態と貫入・定置機構

防府バソリスはどのような貫入・定置機構で形成されたのであろうか。この問題解決には帯磁率異方性 (AMS) や重力異常のデータが有効である (例えば, Bouchez et al., 1990; Vigneresse, 1990) ので, 防府バソリスに関するそれらのデータに基づいて考察する。まず地質学的には本バソリスの中南部では周防変成岩を基盤とし, 粗粒花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑岩および細粒花崗岩の一部が全体的にシート状の形態を有していることが分かっている。山本ほか (2006) は本バソリスを例にして AMS 組織が花崗岩ファブリック

の定量的評価に使える可能性があることを示している。例えば, 帯磁率異方性測定結果から得られた方向データから, 帯磁率線構造は全体的に 2° – 25° と緩やかな傾斜を示し, 山口コールドロンの環状岩脈の分布する小鯖付近では 40° を示す。また大平山の周防変成岩との接触部でも 33° – 47° の急傾斜を示す。そして, 帯磁率面構造は 2° – 36° と全体的に緩やかな西ないし北西傾斜を示し, 山口コールドロンの環状岩脈の分布する小鯖付近では 40° 北西傾斜を示す。帯磁率の線構造と面構造はそれぞれマグマの流動方向と, 壁岩との関係を示すと推定されるので, マグマの流動方向は山口コールドロンの環状岩脈付近や周防変成岩との接触部で急傾斜となり, それ以外ではほぼ水平となって粗粒花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑岩および一部の細粒花崗岩のシート状構造を形成したものと考えられる。急傾斜を示す小鯖付近には小鯖断層があり, 重力異常から推定された花崗岩の底面深度も深く, 下部に向かって凸形になっていることから, 山口コールドロンの環状岩脈の分布域付近に花崗岩の供給口があったと推定される (Fig. 10A)。帯磁率の線構造や面構造から推定される水平構造は野外調査で得られた結果, すなわち, 粗粒花崗岩中に見られる緩傾斜のシュリーレン (Fig. 6A), シート状ペグマタイト (Fig. 6B), シート状の細粒花崗岩の産状 (Fig. 6D), さらに水平方向に扁平に伸張した MME の形態 (山本ほか, 2006) とも整合的である。これらの構造的特徴は, 山口県阿武地域域の白亜紀花崗岩 (神谷, 1974) や広島県内に分布する白亜紀花崗岩からも報告されており (高橋, 1986, 1991; Hayashi, 1995 など), 山陽帯の白亜紀花崗岩ではかなり一般的である可能性がある。以上述べてきたように, 防府バソリスの粗粒花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑岩および細粒花崗岩の示すシート状形態からは, 最終的な定置様式としてダイアピルモデル (Marsh, 1982; Bateman, 1984; Mahon et al., 1988; Schmelling et al., 1988; Anma, 1997 など) やバルーニング (Pitcher, 1979; Ramsay, 1989; Paterson and Vernon, 1995 など) は考えにくい。さらにそれぞれの岩体内には大小の基盤岩を取り込んだ露頭は確認されず, Ca に富んだ斜長石や輝石などのレスタイト鉱物も見られないので, ピースミル・ストーピングやブロック・ストーピング (Marsh, 1982; 高橋, 1997, 1999; 今岡, 2001; Yoshinobu et al., 2003) および部分帯融解モデル (Harris, 1957; 高橋, 1999) も貫入・定置機構から除外される。

最近では防府バソリスのように重力測定と帯磁率異方性によるファブリック解析などから花崗岩体の三次元形態が平板状あるいは楔状であると考えられる例が世界の多くの地域から報告され (Vigneresse, 1995b; Améglio et al., 1997; Benn et al., 1997; McCaffrey and Petford, 1997; Cruden, 1998, 2006; Cruden et al., 1999; Grocott et al., 1999; Hecht and Vigneresse, 1999; Vigneresse et al., 1999; Petford et al., 2000; de Castro et al., 2002; de Saint-Blanquat et al., 2006; Morgan et al., 2008; Petronis et al., 2009; Horsman et al., 2010; Stevenson and Bennett, 2011 など), 割れ目充填モデルが注目を集めている。既存の垂直方向の断層などの割れ目を利用した岩脈による花崗岩

マグマの迅速な輸送(藤井, 1979; Clemens and Mawer, 1992; Petford et al., 1994; Cruden, 1998; Clemens, 1998; Dehls et al., 1998; Wilson et al., 2000; 高田, 2000 など)と上部地殻内でのシルやラコリスなどの空間形成による花崗岩マグマの定置というのが、割れ目充填モデルの一般的な考え方である。実際、フィーダー岩脈からシルへ変換している見事な露頭(Menand, 2008 の Fig. 1 参照)が、北米ユタ州の Henry Mountains で観察されているし、バソリスにマグマを供給した岩脈群の好例がインドの中新世カラコルム・バソリスで知られている(Reichardt and Weinberg, 2012)。また、この定置空間を確保するメカニズムとしては、横ずれ断層に伴うブル・アパートやマグマ溜りの天井を持ち上げるラコリス、マグマ溜りの床の下がるロポリスあるいは地下コールドロンなどが提唱されている(Guineberteau et al., 1987; Hutton, 1996; Cruden, 1998; Grocott et al., 1999; McNulty et al., 2000; 高橋ほか, 2000; 金丸・高橋, 2005 など)。

防府バソリスの場合、割れ目充填モデルによってその三次元形態、花崗岩類およびペグマタイトやアプライトのシート状形態と小鯖付近に想定された供給口の存在などの観察結果や解釈を最もうまく説明することができる。花崗岩マグマの粘性が固結しない程度に低く、岩脈の幅が十分に広ければ(2–20 m; Petford et al., 1994)、マグマの輸送は極めて効率的に行われる(Dehls et al., 1998)。このように考えられる背景としては、従来、花崗岩マグマは粘性が高く、“failed rhyolite”であるという考え方が支配的であったが、最近の花崗岩マグマの粘性に関する実験結果から、部分熔融により生じたマグマの粘性度は従来考えられていた程高くないこと[優白質花崗岩(SiO_2 75 wt.%, H_2O 4 wt.%)で $10^{3.8}$ Pa s、トータル岩(SiO_2 65 wt.%, H_2O 6 wt.%)で $10^{4.9}$ Pa s]が明らかになってきたことによる(Paterson and Tobisch, 1992; Scaillet et al., 1998; Petford et al., 2000; Reid, 2005; de Saint Blanquat et al., 2011)。岩脈によるマグマの上昇速度は速く、3 m の厚さの供給口があれば、花崗岩マグマの一般的な上昇速度は 1 cm/s と推定されるので(Petford et al., 1994)、1,000 年以内で $1,500 \text{ km}^3$ のマグマの供給が可能である(Vignerresse, 1995c)。防府バソリスのように 900 km^3 ($500 \text{ km}^2 \times 1.8 \text{ km}$) の体積とのアスペクト比 10 : 1 を有する巨大な平板状バソリスの形成も理解しやすい。また、そのような空間が形成されるメカニズムとしては、防府バソリスの活動に先だって周南層群や阿武層群の火山活動が起きており、これら火山岩と花崗岩の成因関係を検討した例(弓削ほか, 1998; 今岡ほか, 2001)では両者が同じ Sr-Nd 同位体初生値をもつマグマに由来することも知られているので、先行する大規模な珪長質マグマ噴出に伴う地下コールドロンの形成に求めることも可能である。

すでに述べたように、防府バソリスの地表分布は、榎野川–大原湖断層と佐波川断層に規制されている。さらに、残差重力異常図から推定された地下構造もこれら 2 断層およびそれらの共役方向の小鯖断層に規制されている。榎野川–大原湖断層と佐波川断層は形成時には左横ずれ運動であったこ

とから、これらの断層に挟まれた地域が時計回りに回転することによって空間が形成され、そこに受動的に花崗岩体の貫入が促された可能性もある(Kanaori, 1990; 金折ほか, 1990)。

防府バソリスの定置レベルについては、97 Ma の黒雲母 K-Ar 年代(河野・植田, 1966)と、ほぼ同時期(周南期: 岸ほか, 2007)の火山活動の産物である周南層群物見岳層に貫入していることから制約が与えられる。既述のように物見岳層の積算層厚は 1,900 m と見積もられており(西野・村上, 1965)、本層は接触変成作用を被っている。したがって、細粒花崗岩最上部の定置深度は 2 km 以内と推定され、防府バソリスはサブボルカニックなマグマ溜りの頂部をのぞかせているものと考えられる。

以上のことから防府バソリスは、全体的には水平方向に拡がっているように見えるが、一部に急傾斜の供給口をもつことから、花崗岩の貫入機構として割れ目充填モデルが妥当ではないかと考えている。防府バソリスのシート状構造は地下深部より岩脈によって上昇してきた花崗岩マグマが、周防変成岩中に水平方向に確保された割れ目に定置し、シート状岩体に次々に付加されて形成されたものではないだろうか。すなわち、防府バソリスは Améglio et al. (1997) の示した flat-floored pluton の形態を有し、その形態は連続的なシート状花崗岩の積み重なりによってつくられた sheet-on-sheet モデル(Menand, 2008)によって説明される可能性が高い。一方で斑状花崗岩や高角の接触面を有する細粒花崗岩はシート状花崗岩の積み重なり小さな脈や岩脈状岩体として貫入しているものと推定される。

ま と め

後期白亜紀防府バソリスの貫入・定置機構を解明するために、地質・岩石と重力異常を検討した。主要な結果は以下のとおりである。

1. 防府バソリスは組織や鉱物粒度などの岩相の違いによって粗粒花崗岩、中粒花崗岩、花崗閃緑岩、斑状花崗岩および細粒花崗岩の 5 つのタイプに分類される。これらの花崗岩類は、周防変成岩をルーフペンダントとしてもち、石英斑岩・花崗斑岩・珪長岩の岩脈類に貫かれる。周辺に分布する火山岩層に貫入することから、バソリス最上部の定置深度は地下 2 km 以内と考えられる。
2. 野外で直接観察される各花崗岩類の相互関係は、佐波川以西では粗粒花崗岩の下部に中粒花崗岩が貫入し(under-accretion)、佐波川以东では中粒花崗岩の上部に花崗閃緑岩さらにその上部に細粒花崗岩がシート状に貫入し(over-accretion)、最後に細粒花崗岩が全ての花崗岩に貫入した。ペグマタイト・アプライトや黒雲母シュリーレンには露頭スケールのシート状構造が観察された。このことから防府バソリスは連続的なシート状花崗岩の積み重なりによってつくられたもので sheet-on-sheet モデル(Menand, 2008)によって説明される。
3. 防府バソリスの地質分布と重力異常データの解析結果を対比すると、バソリスの分布域は低重力異常域とよく一

致する。とくに樫野川—大原湖断層と佐波川断層に挟まれたバソリス北東部の細粒花崗岩および斑状花崗岩の分布域は低重力異常が顕著である。本バソリスは水平方向に $33 \times 48 \text{ km}$ にわたって広がり、かつ重力異常を使ったモデル計算から本バソリスは厚さ $500\text{--}3,500 \text{ m}$ と見積もられるので薄い平板状岩体である。バソリス下底面の深度が断層近傍で $3,000 \text{ m}$ を超えていることから、花崗岩マグマの供給口は断層に規制されていると考えられる。帯磁率異方性のデータ(山本ほか, 2006)も flat-floored pluton の形態と調和的である。

4. 防府バソリスの地表分布は、樫野川—大原湖断層と佐波川断層に規制されている。また、重力異常 -8 mGal 以下の領域はこの2断層の間だけに限定される。このことは、防府花崗岩体の地下構造がこれら2断層に支配されていることを示唆している。

謝辞 筑波大学生命環境科学研究科の安間 了氏、立正大学地球環境科学部の川野良信氏および産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門の高木哲一氏には、多くの建設的なコメントをいただき、本稿を改善する上で大変に有意義であった。放送大学鳥取学習センターの西田良平氏には、重力計の使用で便宜をはかっていただいた。本研究を進めるにあたり、地質調査の一部は三宅 壮、木村 元の両氏に、重力測定の一部は澤 功氏にご協力いただいた。記して上記の方々に感謝の意を表します。

文 献

- Acocella, V., 2000, Space accommodation by roof lifting during pluton emplacement at Amiata (Italy). *Terra Nova*, **12**, 149–155.
- Améglio, L., Vignerresse, J. L. and Bouchez, J. L., 1997, Granite pluton geometry and emplacement mode inferred from combined fabric and gravity data. In Bouchez, J. L., Hutton, D. H. W. and Stephens, W. E., eds., *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 199–214.
- Anma, R., 1997, Oblique diapirism of the Yakushima granite in the Ryukyu arc, Japan. In Bouchez, J. L., Hutton, D. H. W. and Stephens, W. E., eds., *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, 295–318.
- 安間 了 (Anma, R.), 2003, 花崗岩の構造と貫入機構. 資源地質学会編 (Soc. Resource Geol., ed.), 資源環境地質学 (*Resource and Environmental Geology*), 179–184.
- Annen, C., 2011, Implications of incremental emplacement of magma bodies for magma differentiation, thermal aureole dimensions and plutonism-volcanism relationships. *Tectonophysics*, **500**, 3–10.
- Aranguren, A., 1997, Magnetic fabric and 3D geometry of the Hombreiro-Sta. Eulalia pluton: **Implications for the Variscan structures of eastern Galicia, NW Spain.** *Tectonophysics*, **273**, 329–344.
- Aranguren, A., Cuevas, J., Tubia, J. M., Roman-Berdiel, T., Casas-Sainz, A. and Gasol-Ponsati, A., 2003, Granite laccolith emplacement in the Iberian arc: AMS and gravity study of the La Tojiza pluton (NW Spain). *Jour. Geol. Soc. London*, **160**, 435–445.
- Bateman, R., 1984, On the role of diapirism in the segregation, ascent and final emplacement of granitoids magmas. *Tectonophysics*, **110**, 211–231.
- Benn, K., Horne, R. J., Kontak, D. J., Pignotta, G. and Evans, N. G., 1997, Syn-Acadian emplacement model for the South Mountain Batholith, Meguma Terrane, Nova Scotia: **magnetic fabric and structural analyses.** *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **109**, 1279–1293.
- Benn, K., Roest, W. R., Rochette, P., Evans, N. G. and Pignotta, G. S., 1990, Geophysical and structural signatures of syntectonic batholith construction: **the South Mountain Batholith, Meguma Terrane, Nova Scotia.** *Geophys. Jour. Int.*, **136**, 144–156.
- Billings, M. P., 1943, Ring-dikes and their origin. *Trans. N. Y. Acad. Sci., Ser. 2*, **5**, 131–144.
- Bouchez, J. L., Gleizes, G., Djouadi, T. and Rochette, P., 1990, Microstructure and magnetic susceptibility applied to emplacement kinematics of granites: the examples of the Foix pluton (French Pyrenees). *Tectonophysics*, **184**, 157–171.
- Brown, M., 1994, The generation, segregation, ascent and emplacement of granite magma: **the migmatite to crustally-derived granite connection in thickened orogens.** *Earth Sci. Rev.*, **36**, 83–130.
- 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 1992, 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 (*1: 100,000, Geological Map of Japan, 3rd Ed.*)
- 地質調査所編 (Geol. Surv. Japan, ed.), 2000, 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2. (*Gravity CD-ROM of Japan, Digital Geological Map, P-2*) 地質調査所 (Geol. Surv. Japan).
- Clemens, J. D., 1998, Observation on the origins and ascent mechanisms of granitic magmas. *Jour. Geol. Soc. London*, **155**, 843–851.
- Clemens, J. D. and Mawer, C., 1992, Granite magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics*, **204**, 339–360.
- Coleman, D. S., Gray, W. and Glazner, A. F., 2004, Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: **Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California.** *Geology*, **32**, 433–436.
- Cruden, A. R., 1998, On the emplacement of tabular granite. *Jour. Geol. Soc. London*, **155**, 853–862.
- Cruden, A. R., 2006, Emplacement and growth of plutons; implications for rates of melting and mass transfer in continental crust. In Brown, M. and Rushmer, T., eds., *Evolution and Differentiation of the Continental Crust*. New York, Cambridge Univ. Press, 455–519.
- Cruden, A. R., Tobisch, O. T. and Launeau, P., 1999, Dinkey Creek pluton, central Sierra Nevada, California: Magnetic fabric evidence for conduit-fed emplacement of a tabular granite. *Jour. Geophys. Res.*, **104**, 10511–10530.
- de Castro, D. L., Branco, R. M. G. C., Martins, G. and de Castro, N. A., 2002, Radiometric, magnetic, and gravity study of the Quixadá batholith, central Ceará domain (NE Brazil): evidence for Pan-African/Brasiliano extension-controlled emplacement. *South Amer. Earth Sci.*, **15**, 543–551.
- Dehls, J. F., Cruden, A. R. and Vignerresse, J. L., 1998, Fracture control of late Archaean pluton emplacement in the northern Slave Province, Canada. *Jour. Struct. Geol.*, **20**, 1145–1154.
- de Saint-Blanquat, M., Habert, G., Horsman, E., Morgan, S. S., Tikoff, B., Launeau, P. and Gleizes, G., 2006, Mechanism and duration of non-tectonically assisted magma emplacement in the upper crust: The Black Mesa pluton, Henry Mountains, Utah. *Tectonophysics*, **428**, 1–31.
- Farina, F., Dini, A., Innocenti, F., Rocchi, S. and Westerman, D. S., 2010, Rapid incremental assembly of the Monte Capanne pluton (Elba Island, Tuscany) by downward stacking of magma sheet. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **122**, 1463–1479.
- 福塚康三郎・金折裕司 (Fukutsuka, K. and Kanaori, Y.), 2002, 断層の地形・地質学的特徴と地震活動および重力異常—島根県南西部, 弥畝山西断層を例として—. 応用地質 (*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **43**, 226–234.

- 藤井直之(Fujii, N.), 1979, 第2章 マグマとその上昇(Magma and its ascent). 横山 泉・荒牧重雄・中村一明編(Yokoyama, I., Aramamaki, S. and Nakamura, K. eds.), 岩波講座 地球科学7 火山(*Earth Science 7, Volcano*), 岩波書店(Iwanami Shoten), 9-34.
- Galadí-Enríquez, E., Galindo-Zaldívar, J., Simancas, F. and Exposito, I., 2003, Diapiric emplacement in the upper crust of a granitic body: the La Bazana granite (SW Spain). *Tectonophysics*, **361**, 83-96.
- Glazner, A. F., Bartley, J. M., Coleman, D. S., Gray, W. and Taylor, R. Z., 2004, Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chamber? *GSA Today*, **14**, 4-11.
- Grocott, J., Garde, A. A., Chadwick, B., Cruden, A. R. and Swager, C., 1999, Emplacement of rapakivi granite and syenite by floor depression and roof uplift in the Paleoproterozoic Ketilidian orogen, South Greenland. *Jour. Geol. Soc. London*, **456**, 15-24.
- Guineberteau, B., Bouchez, J. L. and Vigneresse, J. L., 1987, The Mortagne granite pluton (France) emplaced by pull-apart along a shear zone: **Structural and gravimetric arguments and regional implication**. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **99**, 763-770.
- 萩原幸男・糸田千鶴(Hagiwara, Y. and Itoda, C.), 2001, 地球システムのデータ解析(*Data analysis for Earth System*). 朝倉書店(Asakura Publ.), 154p.
- Harris, P. G., 1957, Zone refining and the origin of potassic basalts. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **12**, 195-208.
- Hayashi, T., 1995, Geological and petrological studies on the Hiroshima granite in the Togouchi-Yuu-Takehara district, Southwest Japan. *Bull. Fac. School Edu., Hiroshima Univ.*, **17**, 95-150.
- Hecht, L. and Vigneresse, J. L., 1999, A multidisciplinary approach combining geochemical, gravity and structural data: implications for pluton emplacement and zonation. In Castro, A., Fernandez, C. and Vigneresse, J. L., eds., *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*, Spec. Publ. Geol. Soc. London, **168**, 95-110.
- Hibbard, M. J., 1981, The magma mixing origin of mantled feldspars. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **76**, 158-170.
- Horsman, E., Morgan, S., de Saint-Blanquat, M., Habert, G., Nugent, A., Hunter, R. A. and Tikoff, B., 2010, Emplacement and assembly of shallow intrusions from multiple magma pulses, Henry Mountains, Utah. *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. Edinburgh*, **100**, 117-132.
- Hutton, D. H. W., 1988, Granite emplacement mechanism and tectonic controls: inferences from deformation studies. *Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci.*, **79**, 145-155.
- Hutton, D. H. W., 1996, The 'space problem' in the emplacement of granite. *Episodes*, **19**, 114-119.
- 井川寿之・今岡照喜(Ikawa, T. and Imaoka, T.), 2001, 山口県中部, 白亜紀阿武群層の火山層序・構造と佐々並コールドロンの発見. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **107**, 243-257.
- 今岡照喜(Imaoka, T.), 2001, 火山-深成複合岩体. 山内靖喜・三梨昂編著(Yamauchi, S. and Mitsunashi, T., eds.), 地学ハンドブックシリーズ13, 新版地質調査法(*Handbook Series of Earth Science 13, Geological Survey, Revised Edition*), 地学団体研究会(Assoc. Geol. Collab. Japan), 168-181.
- 今岡照喜・村上允英(Imaoka, T. and Murakami, N.), 1986, 匹見層群および関連貫入岩類. 村上允英・今岡照喜編集, 西中国および周辺地域の酸性~中性火成活動. 山口大学教養部紀要, 村上允英教授記念号(*Jour. Fac. Liberal Arts, Yamaguchi Univ. Prof. N. Murakami Memorial Vol.*), 84-99.
- 今岡照喜・永松秀崇・井川寿之・秋山美代・加々美寛雄(Imaoka, T., Nagamatsu, H., Ikawa, T., Akiyama, M. and Kagami, H.), 2001, 火山活動と深成活動-西中国の例-. 月刊地球(*Chikyū Monthly*), no. 30, 127-133.
- Imaoka, T. and Nakashima, K., 1983, Temporal and spatial variations of magnetic susceptibility of Cretaceous to Neogene igneous rocks from the central and western Chugoku province, Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, **8**, 1-30.
- Ishihara, S. and Sasaki, A., 2002, Paired sulfur isotopic belts: Late Cretaceous-Paleogene ore deposits of Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **53**, 461-477.
- John, B. E., 1988, Structural reconstruction and zonation of a tilted mid-crustal magma chamber: The felsic Chemehuevi Mountains plutonic suite. *Geology*, **16**, 613-617.
- 神谷雅晴(Kamitani, M.), 1974, 山口県阿武地域白亜系の層序および地質構造-阿武地域ろう石鉱床の研究. その1-. 地調月報(*Bull. Geol. Surv. Japan*), **25**, 105-118.
- 金丸龍夫・高橋正樹(Kanamaru, T. and Takahashi, M.), 2005, 帯磁率異方性からみた丹沢トータル岩体の貫入・定置機構. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **111**, 458-475.
- Kanaori, Y., 1990, Late Mesozoic-Cenozoic strike-slip and block rotation in the inner belt of Southwest Japan. *Tectonophysics*, **177**, 381-399.
- 金折裕司(Kanaori, Y.), 2005, 山口県の活断層(*Active Faults of Yamaguchi Prefecture*). 近未来社(Kinmirraisha Press), 119p.
- 金折裕司・田中竹延・柳田 誠・山口大学断層テクトニクス研究グループ(Kanaori, Y., Tanaka, T., Yanagida, M. and Research Group of Yamaguchi University for Fault Tectonics), 2006, 山口県中部, 大原湖断層系の性状と活動性. 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **47**, 218-231.
- 金折裕司・矢入憲二・川上紳一・竹下 徹(Kanaori, Y., Yairi, K., Kawakami, S. and Takeshita, T.), 1990, 中部日本における断層運動による花崗岩貫入テクトニクス. 地震(*Zisin: Jour. Seismol. Soc. Japan*), **43**, 77-90.
- 加納 博・秋田大花崗岩研究グループ(Kano, H. and Research Group of Granite Plutons, Akita University), 1978, 花崗岩プレートの構造岩石学(I)-北上山地のしずく形プレトン. 岩鉱(*Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **73**, 97-120.
- Kavanagh, J. L., Menand, T. and Sparks, R. S. J., 2006, An experimental investigation of sill formation and propagation in layered elastic media. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 799-813.
- 川上紳一・金折裕司・矢入憲二(Kawakami, S., Kanaori, Y. and Yairi, K.), 1991, 花崗岩の変形構造と貫入テクトニクス. 岩鉱(*Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **86**, 125-139.
- 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.
- 河野義礼・植田良夫(Kawano, Y. and Ueda, Y.), 1966, 本邦産火成岩類のK-A dating(V)-西南日本の花崗岩類-. 岩鉱(*Jour. Japan Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **56**, 191-211.
- 岸 司・今岡照喜・東風平 宏・西村祐二郎・板谷徹丸(Kishi, T., Imaoka, T., Kochihira, H., Nishimura, Y. and Itaya, T.), 2007, 山口県における白亜紀吉部コールドロンおよび関連岩類のK-Ar年代: 西中国地域における白亜紀火山-深成活動の時空変遷. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **113**, 479-491.
- Kistler, R. W., Evernden, J. F. and Shaw, H. R., 1971, Sierra Nevada plutonic cycle, 1. Origin of composite granitic batholiths. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **82**, 853-868.
- 駒澤正夫(Komazawa, M.), 1984, 北鹿地域の定量的重力解析について. 物理探鉱(*Geophys. Exploration*), **37**, 123-134.
- 駒澤正夫・広島俊男・石原丈実・村田泰章・山崎敏嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・志知龍一・岸本清行・木川栄一・三品正明(Komazawa, M., Hiroshima, T., Ishihara, T., Murata, Y., Yamazaki, T., Joshima, M., Makino, M., Morijiri, R., Shichi, R., Kishimoto, K., Kikawa, E. and Mishina, M.), 2000, 地質調査所重力測定値データファイル, 日本重力CD-ROM, 数値地質図P-2(*Gravity Measurements Data File of the Geological Survey of Japan, Gravity CD-ROM of Japan, Digital Geoscience Map P-2*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan).
- 小室裕明・古山勝彦・志知龍一・羽木伸幸・山本明彦(Komuro, H.,

- Furuyama, K., Shichi, R., Hagi, N. and Yamamoto, A.), 2002, 照来コールドロンの重力異常. 火山(*Bull. Volcano. Soc. Japan*), **47**, 9–15.
- 河野芳輝・古瀬慶博(Kono, Y. and Furuse, N.), 1989, 100 万分の 1 日本列島重力異常図(*1:1,000,000 Scale, Gravity Anomaly Map In and Around the Japanese Islands*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 76p.
- Lyell, C., 1865, *Elements of Geology*. John Murray, Albemarle Street, London. 723p.
- Mahon, K. I., Harrison, T. M. and Drew, D. A., 1988, Ascent of a granitoid diapir in a temperature varying medium. *Amer. Jour. Sci.*, **282**, 808–815.
- Marsh, B. D., 1982, On the mechanics of igneous diapirism, stopping, and zone melting. *Amer. Jour. Sci.*, **282**, 808–855.
- McCaffrey, K. J. W. and Petford, N., 1997, Are granitic intrusions scale invariant? *Jour. Geol. Soc. London*, **154**, 1–4.
- McNulty, B. A., Tobisch, O. T. and Cruden, A. R., 2000, Multi-stage emplacement of the Mount Givens pluton, central Sierra Nevada batholith, California. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **112**, 119–135.
- Menand, T., 2008, The mechanics and dynamics of sills in layered elastic rocks and their implications for the growth of laccoliths and other igneous complexes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **267**, 93–99.
- Menand, T., 2011, Physical controls and depth of emplacement of igneous bodies: A review. *Tectonophysics*, **500**, 11–19.
- Menand, T., de Saint-Blanquat, M. and Annen, C., 2011, Preface: Emplacement of magma pulses and growth of magma bodies. *Tectonophysics*, **500**, 1–2.
- Michel, J., Baumgartner, L., Putlitz, B., Schaltegger, U. and Ovtcharova, M., 2008, Incremental growth of the Patagonian Torres del Paine laccolith over 90 k.y. *Geology*, **36**, 459–462.
- Miller, C. F., Furbish, D. J., Walker, B. A., Claiborne, L. L., Koteas, G. C., Bleick, H. A. and Miller, J. S., 2011, Growth of plutons by incremental emplacement of sheets in crystal-rich host: Evidence from Miocene intrusions of the Colorado River region, Nevada, USA. *Tectonophysics*, **500**, 65–77.
- Morgan, S. S., Stanik, A., Horsman, E., Tikoff, B., de Saint-Blanquat, M. and Habert, G., 2008, Emplacement of multiple magma sheets and wall rock deformation: Trachyte Mesa intrusion, Henry Mountains, Utah. *Jour. Struct. Geol.*, **30**, 491–512.
- 村田泰章・須田芳朗・菊地恒夫(Murata, Y., Suda, Y. and Kikuchi, T.), 1991, 日本の岩石物性値—密度, 磁性, P 波速度, 有効空隙率, 熱伝導率—. 地調報告(*Rep. Geol. Surv. Japan*), no. 276, 89–109.
- 永尾隆志(Nagao, T.), 1992, 山口の火山をたずねて—青野山火山群, 阿武単成火山群—. 山口地学会誌(*Rep. Yamaguchi Geol. Soc.*), no. 28, 1–7.
- 永尾隆志(Nagao, T.), 2002, オープンエア・ミュージアム 山口の火山(*Openair Museum, Volcanos of Yamaguchi*). 桜プリント(Sakura Print Co. Ltd.), 51p.
- 中井新二(Nakai, S.), 1979, 実質的な起潮力計算プログラム. 緯度観彙報(*Proceedings of the International Latitude Observatory of Mizusawa*), no. 18, 124–135.
- 西田和浩・今岡照喜・飯泉 滋(Nishida, K., Imaoka, T. and Iizumi, S.), 2005, 山陰中央部における白亜紀—古第三紀火成活動: Rb-Sr アイソクロン年代からの検討. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **111**, 123–140.
- Nishimura, Y., 1998, Geotectonic subdivision and areal extent of the Sangun belt, Inter Zone of Southwest Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **16**, 129–140.
- 西村祐二郎・今岡照喜・金折裕司・亀谷 敦(Nishimura, Y., Imaoka, T., Kanaori, Y. and Kameya, A.), 2012, 山口県地質図 第3版(15 万分の 1) (*Geological Map of Yamaguchi Prefecture, Third Edition 1: 150,000*). 山口地学会(*Geol. Soc. Yamaguchi*).
- 西野英之・村上允英(Nishino, H. and Murakami, N.), 1965, 中国西部に於ける後期中生代酸性岩類の火山層序学的研究(I) 山口県篠目南部地域の酸性火山岩類. 山口大理科報告(*Sci. Rep. Yamaguchi Univ.*), **15**, 9–19.
- 大川侑里・金折裕司・今岡照喜(Okawa, Y., Kanaori, Y. and Imaoka, T.), 2010, 防府市と山口市で発生した土石流の性状と発生メカニズム. 第5回土砂災害に関するシンポジウム論文集(*Proc. 5th Symposium, Sediment-Related Disasters*), 117–122.
- 大川侑里・金折裕司・今岡照喜(Okawa, Y., Kanaori, Y. and Imaoka, T.), 2012, 白亜紀防府花崗岩体で発生した土石流の分布と性状. 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **52**, 248–255.
- Olivier, P., Améglio, L., Richen, H. and Vadeboin, F., 1999, Emplacement of the Aya Variscan granitic pluton (Basque Pyrenees) on a dextral transcurrent regime inferred from a combined magneto-structural and gravimetric study. *Jour. Geol. Soc. London*, **156**, 991–1002.
- Paterson, S. R. and Fowler, Jr. T. H., 1993, Extensional pluton-emplacement model: Do they work for large plutonic complexes? *Geology*, **21**, 781–784.
- Paterson, S. R. and Tobisch, O. T., 1992, Rates of processes in magmatic arcs: Implications for the timing and nature of pluton emplacement and wall rock deformation. *Jour. Struct. Geol.*, **14**, 291–300.
- Paterson, S. R. and Vernon, R. H., 1995, Bursting the bubble of ballooning plutons: a return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **107**, 1356–1380.
- Petford, N., Lister, J. R. and Kerr, R. C., 1994, The ascent of felsic magmas in dykes. *Lithos*, **32**, 161–168.
- Petford, N., Cruden, A. R., McCaffrey, K. J. W. and Vigneresse, J. L., 2000, Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, **408**, 669–673.
- Petronis, M. S., O'Driscoll, B., Troll, V. R., Emeleus, C. H. and Geissman, J. W., 2009, Paleomagnetic and anisotropy of magnetic susceptibility data bearing on the emplacement of the Western Granite, Isle of Rum, NW Scotland. *Geol. Mag.*, **146**, 419–436.
- Pitcher, W. S., 1978, The anatomy of a batholith. *Jour. Geol. Soc. London*, **135**, 157–182.
- Pitcher, W. S., 1979, The nature, ascent and emplacement of granitic magmas. *Jour. Geol. Soc. London*, **136**, 627–662.
- Pitcher, W. S., 1997, *The Nature and Origin of Granite. Second edition*. Chapman & Hall, Kluwer Academic Publishers. 387p.
- Ramberg, H., 1970, Model studies in relation to plutonic bodies. In Newall, G. and Rast, N., eds., *Mechanism of Igneous Intrusion*. Spec. Issue Geol. Jour., **2**, 261–286.
- Ramsay, J. G., 1989, Emplacement kinematics of a granite diapir: the Chindamora batholith, Zimbabwe. *Jour. Struct. Geol.*, **11**, 191–209.
- Reichardt, H. and Weinberg, R. F., 2012, The dike swarm of the Karakoram shear zone, Ladakh, NW India: Linking granite source to batholith. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **124**, 89–103.
- Reid, M. R., 2005, Timescales of magma transfer and storage in the crust. In Rudnick, R. L. ed., *The crust*, Elsevier, 167–193.
- Rosenberg, C. L., Berger, A. and Schmid, S. M., 1995, Observations from the floor of a granitoid pluton: inferences on the driving force of final emplacement. *Geology*, **23**, 443–446.
- Roig, J.-Y., Faure, M. and Truffert, C., 1998, Folding and granite emplacement inferred from structural, strain, TEM and gravimetric analyses: the case study of the Tulle antiform, SW French Massif Central. *Jour. Struct. Geol.*, **20**, 1169–1189.
- 佐川厚志・相山光太郎・金折裕司・田中竹延(Sagawa, A., Aiyama, K., Kanaori, Y. and Tanaka, T.), 2008, 山口県中東部, 徳佐一 地福断層と迫田一 生雲断層の性状および活動性. 応用地質(*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*), **49**, 78–93.

- Saint-Blanquat, M. (de), Horsman, E., Habert, G., Morgan, S., Vanderhaeghe, O., Law, R. and Tikoff, B., 2011, Multiple magmatic cyclicality, duration of pluton construction, and the paradoxical relationship between tectonism and plutonism in continental arcs. *Tectonophysics*, **500**, 20–33.
- 山陰バソリス研究グループ(Research Group for the Batholith in the San'in Zone), 1982, 根雨花崗岩体—山陰帯におけるバソリス研究(その1)ー. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **88**, 299–310.
- 佐脇貴幸(Sawaki, T.), 1985, 山口県防府地域に分布する含コランダム泥質ホルンフェルス. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **91**, 719–722.
- Scaillet, B., Holtz, F., Pichavant, M., 1998, Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicic magmas. 1. Volcano-plutonic comparison. *Jour. Geophys. Res.*, **103**, 27257–27266.
- Schmelling, H., Cruden, A. R. and Marquart, G., 1988, Finite deformation in and around a fluid sphere moving through a viscous medium: implications for diapiric ascent. *Tectonophysics*, **149**, 17–34.
- 志知龍一・山本明彦(Shichi, R. and Yamamoto, A.), 1994, 西南日本における重力データベースの構築. 地調報告(*Rep. Geol. Surv. Japan*), **280**, 1–8.
- Shichi, R. and Yamamoto, A. (Representatives of the Gravity Research Group in Southwest Japan), 2001, *Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM)*, Bull. Nagoya Univ. Mus., Spec. Rept., no. 9.
- Steiger, R. H. and Jäger, E., 1977, Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **36**, 359–362.
- Stevenson, C. T. E. and Bennett, N., 2011, The emplacement of the Paleogene Mourne Granite Centres, Northern Ireland: new results from the Western Mourne Centre. *Jour. Geol. Soc. London*, **168**, 831–836.
- Taira, A., 2001, Tectonic evolution of the Japanese island arc system. *Ann. Rev. Earth Sci.*, **29**, 109–134.
- 高田 亮(Takada, R.), 2000, 珪長質マグマの輸送メカニズム. 月刊地球(*Chikyū Monthly*), no. 30, 98–104.
- 高橋正樹(Takahashi, M.), 1997, マグマの輸送. 岩波講座8, 地殻の形成(*Formation of the Crust*), 岩波書店(Iwanami Shoten), 72–79.
- 高橋正樹(Takahashi, M.), 1999, 花崗岩が語る地球の進化(*Granite: its Implications for Evolution of the Earth*). 岩波書店(Iwanami Shoten), 147p.
- 高橋正樹・石渡 明(Takahashi, M. and Ishiwatari, A.), 2012, フィールドジオロジー8, 火成作用(*Field Geology 8, Igneous Geology*). 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 202p.
- 高橋正樹・金丸龍夫・岡田 誠(Takahashi, M., Kanamaru, T. and Okada, M.), 2000, 帯磁率異方性からみた花崗岩マグマの貫入・定置メカニズム—丹沢トータル岩体の例—. 月刊地球号外(*Chikyū Monthly*), no. 30, 114–119.
- 高橋裕平(Takahashi, Y.), 1986, 大竹—津田地域の広島花崗岩類の岩石記載. 地調月報(*Bull. Geol. Surv. Japan*), **37**, 507–514.
- 高橋裕平(Takahashi, Y.), 1991, 広島地域の地質地域, 地質研究報告(5万分の1地質図幅), (*Geology of the Hiroshima district. With Geological Sheet Map at 1:50,000*). 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 41p.
- 高橋裕平・牧本 博・脇田浩二・酒井 彰(Takahashi, Y., Makimoto, H., Wakita, K. and Sakai, A.), 1989, 津田地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), (*Geology of the Tsuda district. With Geological Sheet Map at 1:50,000*). 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 56p.
- 武田賢治・今岡照喜(Takeda, K. and Imaoka, T.), 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(*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 53, 199–219.
- Vigneresse, J. L., 1990, Use and misuse of geophysical data to determine the shape at depth of granitic intrusions. *Geol. Jour.*, **25**, 249–260.
- Vigneresse, J. L., 1995a, Control of granite emplacement by regional deformation. *Tectonophysics*, **249**, 173–186.
- Vigneresse, J. L., 1995b, Crustal regime of deformation and ascent of granite magma. *Tectonophysics*, **249**, 187–202.
- Vigneresse, J. L., 1995c, Far- and near- field deformation and granite emplacement. *Geodinamica Acta*, **8**, 211–227.
- Vigneresse, J. L., Tikoff, B. and Améglio, L., 1999, Modification of the regional stress field by magma intrusion and formation of tabular granite plutons. *Tectonophysics*, **302**, 203–224.
- Wilson, J., Ferre, E. C. and Lespinasse, P., 2000, Repeated tabular injection of high-level alkaline granites in the eastern Bushveld, South Africa. *Jour. Geol. Soc. London*, **157**, 1077–1088.
- 山本明彦・志知龍一(Yamamoto, A. and Shichi, R.), 2004, 日本列島重力アトラス. 西南日本および中央日本(*Gravity Anomaly Atlas of the Japanese Islands: South-west and central Japan*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 336p.
- 山本慎一・今岡照喜・金丸龍夫・田結庄良昭(Yamamoto, S., Imaoka, T., Kanamaru, T. and Tainosho, Y.), 2006, 山口県中南部, 白亜紀防府花崗岩バソリスの岩石学的特徴と帯磁率異方性: 貫入・定置機構の解明に向けて. 地球科学(*Earth Sci. (Chikyū Kagaku)*), **60**, 415–429.
- Yoshinobu, A. S., Fowler, Jr. T. K., Paterson, S. R., Llambias, E., Tickyj, H. and Sato, M., 2003, A view from the roof: magmatic stoping in the shallow crust, Chita pluton, Argentina. *Jour. Struct. Geol.*, **25**, 1037–1048.
- 弓削智子・今岡照喜・飯泉 滋(Yuge, T., Imaoka, T. and Iizumi, S.), 1998, 山口県阿武地域における流紋岩類と全岩化学組成およびSr, Nd同位体比. 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **104**, 159–170.

(要 旨)

今岡照喜・小室裕明・山脇恵理香・金折裕司・大川侑里・金田孝典・山本明彦, 2012, 山口県後期白亜紀防府バソリスの三次元形態: 地質・岩石と重力異常からの推定. 地質雑, 118, 782-800. (Imaoka, T., Komuro, H., Yamawaki, E., Kanaori, Y., Okawa, Y., Kaneda, T. and Yamamoto, A., 2012, Three-dimensional geometry of the Late Cretaceous Hofu batholith (Yamaguchi Prefecture, Japan) inferred from geological, petrographic, and gravity anomaly observations. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 118, 782-800.)

後期白亜紀防府バソリスの三次元形態と貫入・定置機構を解明するために, 地質・岩石と重力異常を検討した. 本バソリスは岩石組織や鉱物粒度などの岩相の違いによって粗粒花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑岩, 斑状花崗岩および細粒花崗岩に区分され, それらはシート状花崗岩の累重により構成される. 最上部の定置深度は同時代の火山岩層に貫入することから地下2 km以内と考えられる. 防府バソリスの分布域は負の重力異常域とよく一致し, とくに榎野川-大原湖断層と佐波川断層に挟まれた北東部でそれが顕著である. 本バソリスは水平方向に33 × 48 kmにわたって広がり, 重力異常を使ったモデル計算から, 厚さ500-3,500 mと見積もられることから, 水平に広がった薄い平板状岩体であると見なされる. バソリス下底面の深度が3,000 mを超える部分が断層近傍に見られることから, 花崗岩マグマの供給口は断層に規制されていると考えられる.