

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

山本慎一^{*†}・今岡照喜^{*}・金丸龍夫^{**}・田結庄良昭^{***}

Petrography and anisotropy of magnetic susceptibility of the Cretaceous Hofu granitic batholith, south-central Yamaguchi Prefecture, SW Japan: implication of emplacement mechanism

YAMAMOTO Shin-ichi^{*†}, IMAOKA Teruyoshi^{*}, KANAMARU Tatsuo^{**}
and TAINOSHO Yoshiaki^{***}

Abstract In this paper, we describe the geology and petrography and anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) of the Cretaceous Hofu granitic pluton.

The Hofu granitic pluton forms a $50 \times 38 \text{ km}^2$ batholith in south-central Yamaguchi Prefecture. Based on detailed petrographical study, five lithofacies were identified within it. (1) The coarse-grained granite is distributed as a tabular sheet in the western part of the Saba River district, and is intruded and underlain by the sheet-like medium-grained granite. (2) The coarse-grained granite grades into the porphyritic granite which often contains rapakivi feldspars. (3) The medium-grained granite consisting of homogeneous biotite-granite is widely distributed in the study area, and is intruded by the granodiorite. (4) The granodiorite is found in the area from Mt. Yahazugatake to Sasahara, where it overlies the medium-grained granite as a tabular sheet. (5) Small bodies of the fine-grained granite are distributed sporadically throughout the area studied. These bodies intrude all other lithologies and contain roof pendants of Suo metamorphic rocks.

We measured the AMS in 169 core samples collected at 20 sites within the pluton, to examine the ascent and emplacement mechanism of magmas. AMS is a useful petrophysical tool which can be used to detect orientations, intensity and shape of fabric alignment easily and quickly. These data can be also used to unravel the mechanisms involved during ascent and emplacement of felsic magma into the continental crust.

The AMS results show that the Hofu granitic pluton has magnetic foliations dipping gently to the west, and magnetic lineation with gentle inclination. These results agree with the geologic structure revealed by the field survey, which suggests that the granitoids were emplaced as tabular sheets of several kilometers thick. The granite magmas may have been fed along one or more vertical conduits, and subsequently flowed horizontally at the level of emplacement to form the tabular sheets.

Key Words : Cretaceous granite batholith, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), fabric, emplacement, tabular sheet

序 論

花崗岩マグマの貫入・定置メカニズムとしては、マグマが延性的に母岩を變形させながら浮力によって上昇するダイア

ピルや、マグマが定置レベルで風船を膨らませるように集積するバルーニングが、また脆性的な變形を伴うものとしてストーピングや岩脈による割れ目充填などが考えられる (Ramberg 1970; Bateman 1984; Schmelling et al. 1988; Marsh

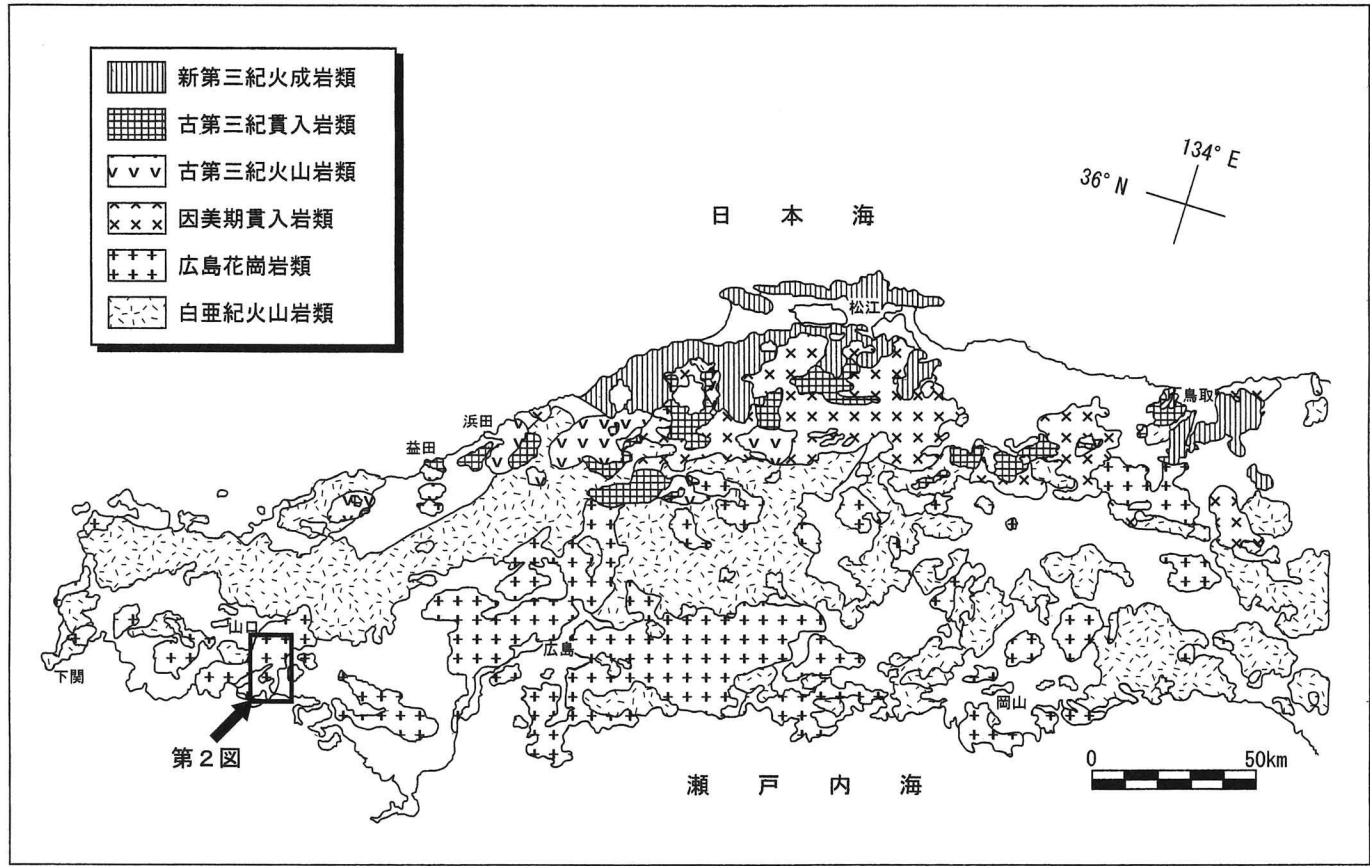
2005 年 8 月 2 日受付. 2006 年 6 月 27 日受理.

* 山陽支部, 山口大学大学院理工学研究科, 〒753-8512 山口市吉田 1677-1
Graduate School of Science and Technology, Yamaguchi University, 1677-1 Yoshida, Yamaguchi 753-8512, Japan

† 株式会社アイ・エヌ・エー, 〒112-8668 東京都文京区関口 1 丁目 44-10
INA Corporation, 1-44-10 Sekiguchi, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8668, Japan

** 神戸大学大学院自然科学研究科, 〒657-0013 神戸市灘区六甲台町 1-1
Graduate School of Science and Technology, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe 657-0013, Japan

*** 関西支部, 神戸大学発達科学部人間環境学科, 〒657-8507 神戸市灘区鶴甲 3-11
Faculty of Human Development, Kobe University, 3-11, Tsurukabuto, Nada, Kobe 657-8501, Japan



第1図 中国地方における白亜紀～第三紀火成岩類の分布図 (地質調査所, 1992の100万分の1日本地質図 第3版をもとに改変)

Fig. 1 Map showing distribution of Cretaceous and Tertiary igneous rocks in the Chugoku District, Japan (Modified after geologic map of Japan, 1:1,000,000 3rd Ed., Geological Survey of Japan, 1992).

1982; Zorpi et al. 1989; Hutton 1996; 高橋 1997; 安間 2003; Yoshinobu et al. 2003). マグマの上昇機構としては, ダイアピルと岩脈 (dyking) が代表的な2つの端成分モデルである (Clemens 1998). 1970年代までは, ダイアピル・モデルが優勢であったが, 1980年代後半から1990年代になると, 上部地殻内への定置メカニズムとしてのダイアピル・モデルに対して批判が高まり, 岩脈 (割れ目充填) モデルが優勢となってきた (高橋 2001).

花崗岩体の三次元形態として, 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 tabular なものがあると考えられている (Ameglio et al. 1997; Cruden et al. 1999; Hecht and Vigneresse 1999 など). このような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 pull apart 空間, 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 (Hutton 1996; McNulty et al. 2000; 高橋ほか 2000 など). 垂直方向の岩脈による花崗岩マグマの輸送と上部地殻内で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 (Cruden 1998; Wilson et al. 2000 など).

西南日本内帯には, 白亜紀～古第三紀に形成された花崗岩類が広く分布している (第1図). これらの花崗岩類は, 広島を中心とした白亜紀の中国バソリスや古第三紀の山陰バソリスなどの大規模なバソリスを形成している. 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成因や地殻上部への上昇・貫入・定置, さらに冷却・固結の段階を含めたバソリス形成の諸過程を解明するためには, それを構成する花崗岩類の岩相変化, 貫入関係, 形態および内部構造を明らかにする必要がある.

近年, 花崗岩の貫入・定置メカニズムを解明するための岩石物理学的ツールとして, 帯磁率異方性 (AMS=Anisotropy of Magnetic Susceptibility) に注目が集まっている (McNulty et al. 2000 など). 花崗岩が固結後, 二次的な変形を受けていなければ, AMSから花崗岩が貫入・定置した時に記録・保存されている magnetic fabric を読み取ることができる (Tarling and Hrouda 1993; 安間 2003). 帯磁率異方性測定法の利点は, i) 磁性鉱物を含むすべての岩石に適応でき, 強磁性鉱物が含まれていない岩石, すなわちイルメナイト系列の岩石でも測定できること, ii) 測定は簡便で, 短時間で済むこと, iii) 非破壊で繰り返し測定精度も良いこと, iv) 露頭では肉眼で

ファブリックが明らかにならないような場合でもファブリックを検出可能であることである(中井 2000; 安間 2003)。

海外では AMS を用いた深成岩類についての研究は、多く知られている(例えば、Ameglio et al. 1997; Paterson et al. 1998; McNulty et al. 2000 など)。一方、国内では高橋ほか(2000)、金丸・高橋(2005)による丹沢トータル岩の研究、および金丸(2002)による山梨県東部新第三紀小島山花崗閃緑岩を例とした浅所貫入岩のマグマ流動解析などが知られているが、報告例は少ない。

本研究では山口県中南部に広い分布面積を有する白亜紀防府花崗岩体を研究対象として、野外において岩相変化を徹底的に調査するとともに、室内で鏡下での岩石記載学的特徴や帯磁率異方性について検討したので、これまでに得られた知見を報告する。さらにこれらの結果に基づいて、防府花崗岩体の貫入および定置メカニズムについて議論する。

地質概説

西南日本内帯の花崗岩類の帯状区分によれば、白亜紀防府花崗岩は山陽帯の花崗岩類に分類される(Ishihara 1977; 石原 1980)。黒雲母の K-Ar 年代として 97Ma(河野・植田 1966)が報告されている。

防府花崗岩体は、山口・防府・宇部の 3 市およびその周辺町村にまたがって分布し、南北 38km、東西 50km の広がりをもつバソリスをなしている。本研究では、防府岩体の中央部である山口市小鯖から佐波川を挟み防府、徳山両市の境界にかけての地域を研究対象とした(第 1 図)。地質図および地質断面図を第 2 図に示す。防府花崗岩体は周防変成岩(Nishimura 1998)を貫き、石英斑岩・花崗斑岩・珪長岩の岩脈類に貫かれる。

周防変成岩は、報告地域東部の大平山付近に広く分布し、花崗岩の上にルーフペンダントとして見られるほか、北部の山口尾〜藪ヶ尻や西部の小鯖に小規模に分布する。泥質片岩を主体とした岩石で、緩やかな北傾斜を示し、防府花崗岩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。本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でコランダムが普遍的に産出する(佐脇 1985)。

岩相区分とその相互関係

本研究では、防府花崗岩をその組織や鉱物粒度による岩相の違いによって、粗粒花崗岩・斑状花崗岩・中粒花崗岩・花崗閃緑岩・細粒花崗岩の 5 タイプに区分した(第 2 図)。これら花崗岩のモード組成を第 3 図に示す。

このうち粗粒花崗岩は佐波川より西側の楞巖寺山から山口尾にかけて分布する。山口尾の東斜面や北斜面では、中粒花崗岩より地形的高所に分布する(第 2 図)。中粒花崗岩は佐波川を挟んで最も広い分布域を示し、南は右田ヶ岳から北は

稔畑うつきばたに向かって粗粒花崗岩を取り巻くようにして分布している。中粒花崗岩は、斑状花崗岩と粗粒花崗岩を貫き、細粒花崗岩と岩脈類に貫かれている。

粗粒花崗岩と中粒花崗岩の接触部を表すスラブ写真を第 4 図に示す。この図から中粒花崗岩が粗粒花崗岩の中に入り込んでいる様子がわかる。両者の接触部は、シャープな境界を示さず、境界部に急冷縁を伴うことはない。したがって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。

斑状花崗岩は調査地域北東部の鳴瀧なるたきを中心に小規模に分布し、粗粒花崗岩とは漸移関係にある。そして中粒花崗岩、細粒花崗岩および岩脈類に貫かれる。

花崗閃緑岩は佐波川東部の矢筈ヶ岳から笹原にかけて分布し、防府盆地北～東縁の比較的低位に分布する中粒花崗岩の上位にシート状に載っている(第 2 図)。花崗閃緑岩と中粒花崗岩との直接の接触部の確認はできなかったが、野外では両者は急激に移り変わることや中粒花崗岩は接触部付近においてもまった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。

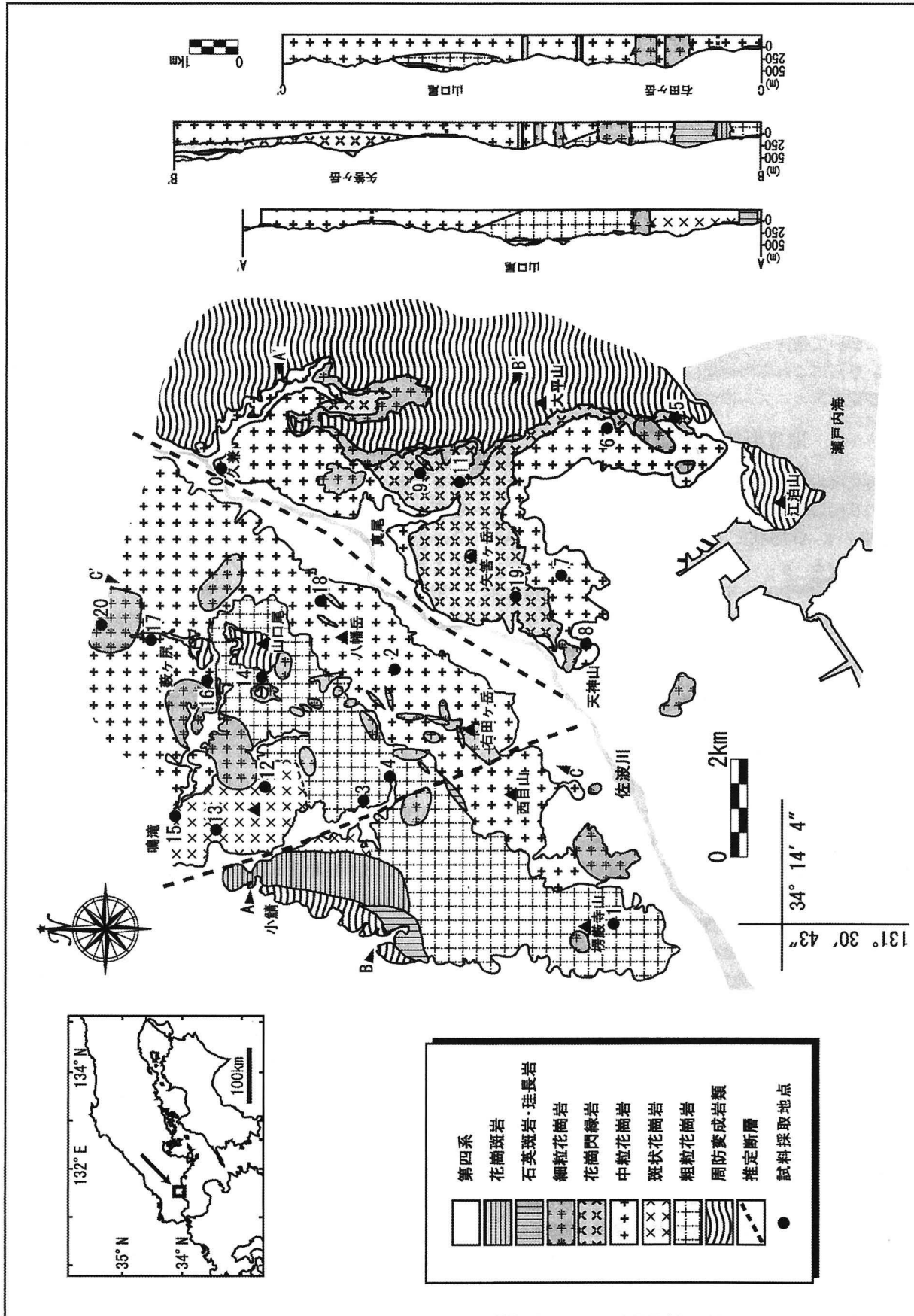
細粒花崗岩は各地に小規模に点在分布し、すべての岩相に貫入している。さらに石英斑岩、花崗斑岩および珪長岩からなる岩脈群は花崗岩類を貫く。石英斑岩が細粒花崗岩を貫いている接触部では、淡緑色の急冷周縁相が見られる。また石英斑岩が細粒花崗岩をブロック状に取り込んでいることもある。岩脈の貫入方向には北東-南西方向および南北方向がある。岩脈の幅は 10～80m である。調査地域の西部に分布する石英斑岩と花崗斑岩は、山口コールドロンの環状岩脈(武田・今岡 1999)として防府花崗岩体に貫入している。

以上のことから、岩相間の相互関係は第 5 図のようにまとめられる。まず粗粒花崗岩およびそれと漸移する斑状花崗岩が貫入して、その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。それを花崗閃緑岩が貫き、最後に細粒花崗岩がすべての岩相を貫く形で防府花崗岩体を形成し、これらに石英斑岩・花崗斑岩・珪長岩の岩脈が貫入したと考えられる。さらに野外調査の結果から、本調査地域の花崗岩類はシート状構造を示すことも分かった。すなわち佐波川の西側では、中粒花崗岩の上位に粗粒花崗岩が、佐波川の東側では、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がシート状に重なる。

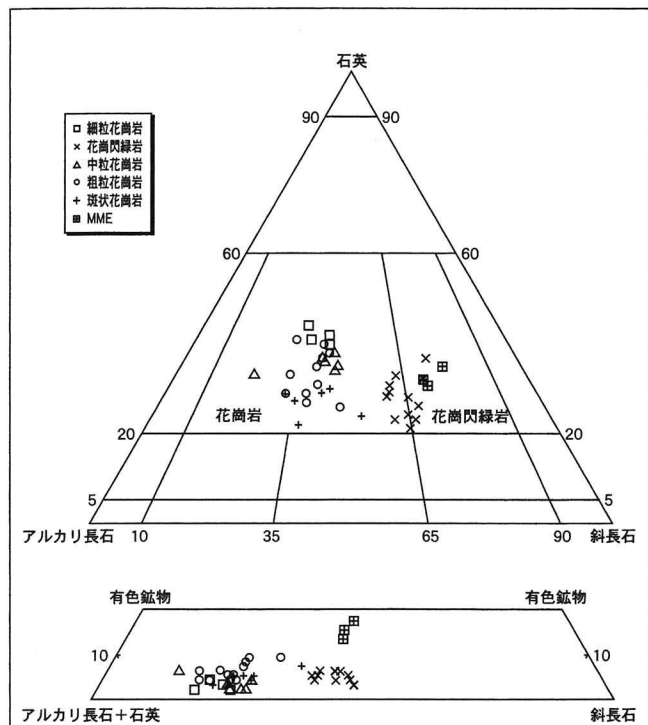
岩石記載

粗粒花崗岩

粗粒花崗岩は一般に塊状かつ優白質で、黒雲母の foliation は認められない。しかし、第 6 図に示すよう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。黒雲母の濃集部分はほぼ水平方向で、マグマの流動に伴って流れたような産状

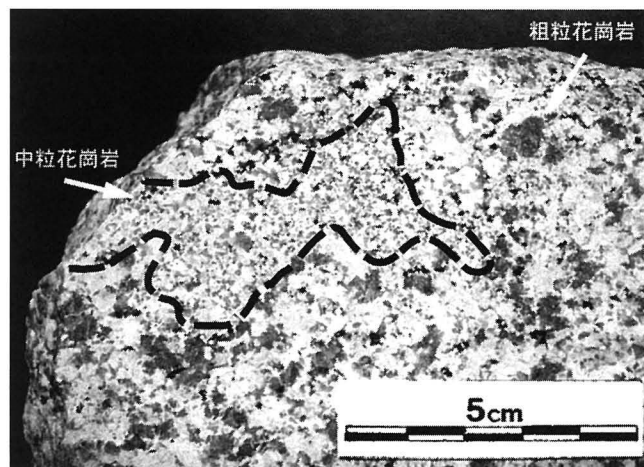


第2図 山口一防府地域の地質図、地質断面図および試料採取位置図
 Fig. 2 Geological map, cross section and sampling location of Yamaguchi-Hofu district, Yamaguchi Prefecture, Japan.



第3図 山口-防府地域の花崗岩類のモード組成三角図 (命名はIUGS Subcommission 1973による)

Fig. 3 Modal composition of granites in Yamaguchi-Hofu district, Yamaguchi Prefecture (after IUGS Subcommission 1973).

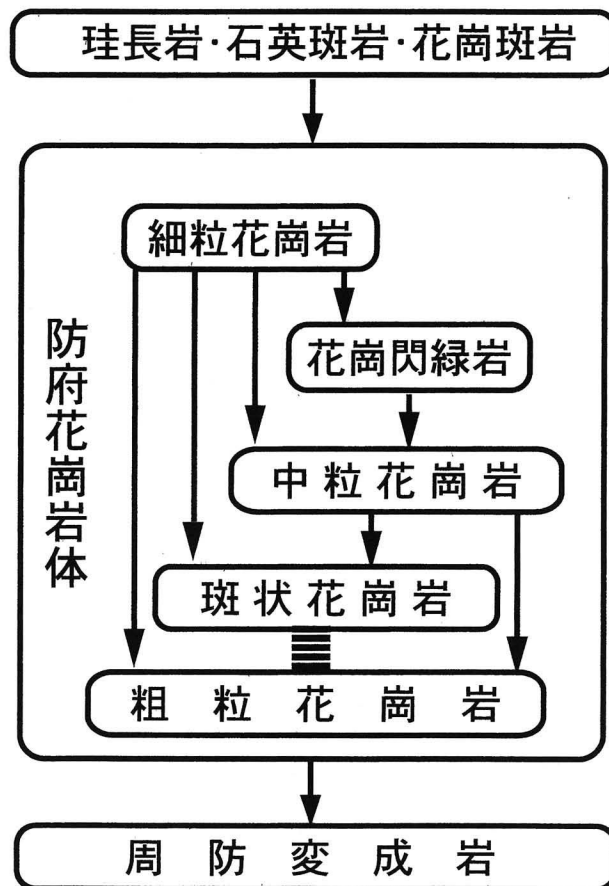


第4図 粗粒花崗岩と中粒花崗岩の接触関係を示すスラブ写真

Fig. 4 Photograph of rock slab showing contact relationship between coarse-grained and medium-grained granites.

をしている。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いている黒雲母-石英オセリが確認できる。

代表的な粗粒花崗岩試料の顕微鏡写真を第7A図に示す。岩相は不均質かつ優白質である。また自形のカリ長石や斜長石を含む。主要構成鉱物は、石英、カリ長石、斜長石および

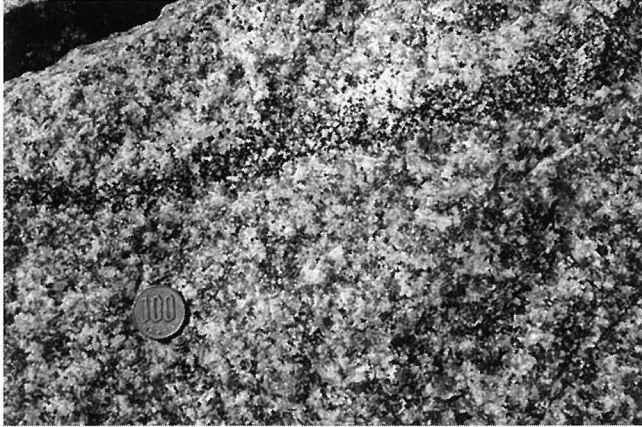


A → B AがBに貫入
A ■■■ B AとBが漸移

第5図 防府花崗岩体を構成する各岩相の貫入関係図

Fig. 5 Intrusive relationship of granitoids in the Hofu granitic pluton.

黒雲母からなり、副成分鉱物としてジルコン、アバタイト、イルメナイト、磁鉄鉱(±)および黄鉄鉱(±)が含まれる。石英は半自形~他形で、波動消光を示すことがある。大きな結晶のサブグレイン化も顕著に見られる。斜長石は大きいものは長柱状、小さいものは短柱状から粒状のものまでである。一部にミルメカイト組織が見られる。また累帯構造が見られ、斑晶の中心部が絹雲母化していることが多い。カリ長石は顕著なパーサイト構造を示す(第7A図)。比較的大きな自形結晶と、他鉱物の間隙を充填する小結晶が観察される。黒雲母は板状結晶として産し、X = 淡黄色、Y = Z = 暗褐色の多色性を示す。さらに一部で緑泥石化し、ジルコンのまわりには多色性ハローが見られる。Fe-Ti酸化鉱物としては、黒雲母中に径100μmのイルメナイトが見られるほか、劈開に沿った数10μmの不規則他形あるいは短柱状イルメナイトが見られる。また、石英やカリ長石に伴って最大径約



第6図 粗粒花崗岩中に見られるシュリーレン
Fig. 6 Schlieren in the coarse-grained granite.

250 μm の他形磁鉄鉱が認められることがある。

中粒花崗岩

代表的な中粒花崗岩試料の顕微鏡写真を第7B図に示す。岩相は不均質かつ優白質である。先に述べた粗粒花崗岩とは、鉱物粒度の違いを除くと良く類似している。

等粒状組織を示し、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(±)を含む。さらに二次鉱物として、一部に白雲母を含んでいる。石英は半自形～他形で、波動消光を示すことがある。斜長石は自形～半自形で、累帯構造を示す。一部に1cm前後の斑晶がみられることがあり、斑晶の内部には黒雲母が観察される。さらに斑晶の中心が変質している。また一部にミルメカイト組織が見られる。カリ長石はパーサイト構造が顕著である。黒雲母は板状～長柱状で、 $X = \text{淡黄色}$ 、 $Y \approx Z = \text{暗褐色}$ の多色性を示す。しばしばクロットをなす。さらに一部で緑泥石化し、ジルコンのまわりには多色性ハローが見られる。Fe-Ti酸化鉱物としては、黒雲母中に径100 μm 大の他形粒状イルメナイトが見られるほか、黒雲母の劈開に沿った最大径150 μm 大の針状～長柱状イルメナイトが見られる。最大径120 μm でイルメナイト・ラメラを有する自形磁鉄鉱がカリ長石中に観察されることもある。

斑状花崗岩

岩相は極めて不均質で、鉱物の平均粒度も不均質である。粒度の大きいものでは長径1.5cmの自形性が強いカリ長石や斜長石の斑晶状結晶を含む。カリ長石は淡いピンク色を呈している。しかし第7C図のようにカリ長石や斜長石の斑晶が5mm以下で、石基が緻密なものも斑状花崗岩に含めている。一部にラパキビ長石が認められる。

斑状組織を示し、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褐簾石、ジルコン、少量のアパタイト、磁鉄鉱およびイルメナイトが含まれる。二次鉱物として白雲母や黄鉄鉱が一部見られる。石英は半自

形～他形で、波動消光を示し、ミルメカイト組織も見られる。また細粒斑状花崗岩の中では微文象組織が見られる。カリ長石はパーサイト構造が顕著で(第7C図)、自形～半自形の3cmを超える大きな斑晶として存在する。斜長石は自形～半自形で、斑晶の中心部は変質が著しい。第7D図にはカリ長石の周りを自形セル状の斜長石集合体を取り囲んだラパキビ組織を示す。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2cmに達する大きな斜長石も含まれる。これらは一般にマグマ混合の産物と考えられている(Hibbard 1981)。黒雲母は板状結晶として産し、 $X = \text{淡黄色}$ 、 $X \approx Z = \text{暗褐色}$ の多色性を示す。一部緑泥石化している。Fe-Ti酸化鉱物としては、最大径500 μm の自形～半自形の磁鉄鉱が見られ、これには幅5 μm のイルメナイト・ラメラを有するものとラメラを有しないものがある。イルメナイトには最大径100 μm の自形～半自形の単独結晶や黒雲母の劈開に沿った針状のものが認められる。

花崗閃緑岩

モード組成を示す三角図では、花崗岩と花崗閃緑岩のフィールドにプロットされる(第3図)。代表的な花崗閃緑岩試料の顕微鏡写真を第7E図に示す。花崗閃緑岩は不均質で、有色鉱物が濃集したクロットが確認できる。また長径1cm程度の斜長石を含み、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。副成分鉱物として多くのアパタイト、ジルコン、チタン石、イルメナイトおよび黄鉄鉱(±)を含む。斜長石は自形～半自形を示し、アルバイト双晶やカールスバト双晶が見られる。さらに斑晶の中心が変質していることが多い。石英は斑晶状の大型のものと、結晶粒間を充填する小型のものがある。斑晶状のものはサブグレイン化したり、波動消光を示すものがある。カリ長石は石英とともに結晶間を充填するように産し、パーサイト構造を示す。黒雲母は板状で、 $X = \text{淡黄色}$ 、 $Y \approx Z = \text{暗褐色}$ の多色性を示す。さらに一部で緑泥石化している。角閃石は自形～半自形を示し、淡緑色や赤褐色の多色性を呈する。さらに黒雲母とともに集斑状に産するものや単独の結晶として産するものがある。また一部で緑泥石化している。Fe-Ti酸化鉱物としては、黒雲母に伴う最大径250 μm のイルメナイトの他形粒状結晶が認められるほか、カリ長石や斜長石に包有される最大径70 μm のイルメナイトも認められる。

細粒花崗岩

岩相は不均質かつ優白質である(第7F図)。他の岩石と比較してやや石英に富む(第3図)。

主要構成鉱物は石英、カリ長石、斜長石および少量の黒雲母からなり、副成分鉱物としてジルコン、アパタイトおよびイルメナイトを含む。また二次鉱物として少量の白雲母を含んでいる。石英は半自形～他形で、波動消光を示すものもある。さらに微文象組織が認められることがある。カリ長石は半自形～他形で、パーサイト構造が顕著である。斜長石は自



第7図 花崗岩類の顕微鏡写真

A: 粗粒花崗岩, B: 中粒花崗岩, C: 斑状花崗岩, D: 斑状花崗岩中に見出されたラパキビ組織, E: 花崗閃緑岩, F: 細粒花崗岩

Fig. 7 Photomicrographs of granites. A: Coarse-grained granite, B: Medium-grained granite, C: Porphyritic granite, D: Rapakivi texture found in the porphyritic granite, E: Granodiorite, F: Fine-grained granite.

形～半自形で、一部にミルメカイト組織も発達している。黒雲母は小型の他形結晶として産し、X = 淡黄色、Y = Z = 暗褐色の多色性を示す。また一部で緑泥石化している。ジル

コンのまわりには多色性はハローが見られる。イルメナイトは、黒雲母の劈開に沿った最大径 350 μm の柱状結晶として産する。



第8図 粗粒花崗岩中に見られる苦鉄質火成包有岩 (MME)

Fig. 8 Mafic magmatic enclaves (MME) found in the coarse-grained granite.

岩脈類

石英斑岩は、石英とカリ長石の斑晶と珧長質で緻密な石基からなる。顕微鏡下では、自形性の強い石英の斑晶が目立つ。

花崗斑岩は、カリ長石および石英の斑晶と珧長質で緻密な石基からなる。顕微鏡下では、球果組織が確認できる。副成分鉱物としてアパタイトがみられる。

珧長岩は無斑晶質で緻密な石基をもつ。また肉眼で流理構造が見られることもある。

苦鉄質火成包有岩 (MME)

本地域の粗粒花崗岩中には苦鉄質火成包有岩 (MME: mafic magmatic/microgranular enclave) が含まれる。第8図は本地域で見られる MME の露頭写真である。水平方向に伸びた形態を示す。本地域では、粗粒花崗岩中に見られることが多い。肉眼観察によると、岩相は優黒質かつ細粒で、形も長径 1.5~2.0m の楕円形をしたものや長径数 cm~数十 cm のレンズ状のもの、さらに水平方向に伸ばしたもの、または数十 cm の球形のものなど様々な形および大きさを示す。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。

モード分析の結果、花崗閃緑岩の領域にプロットされる (第3図)。主要構成鉱物は斜長石、石英、黒雲母およびカリ長石で、カリ長石はこれらの間隙を充填する。また副成分鉱物として細かい針状アパタイトを多数含む。

帯磁率異方性

帯磁率異方性は、岩石試料に異なる方向から磁場をかけた時に試料が獲得する誘導磁化強度を方位ごとに測定し、異方性の三次元対称テンソルの固有値を求めることによって得られる。帯磁率異方性は、互いに直交する3つの軸、すなわち、 K_{max} (最大帯磁率方向; 長軸 = k_1)、 K_{int} (中間帯磁率方向; 中軸 = k_2)、 K_{min} (最小帯磁率方向; 短軸 = k_3) をもつ帯磁率異方性楕円体で表わされる (中井 2000, 2004)。岩石の帯磁

率異方性の場合、一般に K_{max} は岩石組織の線構造と一致し、 K_{min} の方向は面構造の法線の方向と一致すると考えられており、それぞれ magnetic lineation, magnetic foliation と呼ばれることもある。

試料の採取・作成方法

野外では、1つの露頭から最低6個の定方位ブロックサンプルを採取し、ブロックサンプルごとに1個以上のコアサンプルを切り出した。ブロックサンプルを石膏で固めた後、ダイヤモンドコアドリル (株式会社コンセック製 SPF-6A) を使用してコアを掘削した。採取した防府花崗岩類が低い帯磁率を示す (Imaoka and Nakashima 1983) ということを考慮して、コアの整形段階での金属粒子の付着などによる AMS への影響を抑えるために試料のまわりを研磨して、超音波洗浄を行った。

方向をマーキングしたコアをパラフィルムで覆い、測定時に微細な粉末が落ちることで測定数値に誤差が生じないようにした。またこの時に帯磁率異方性の測定の際に入力するコア試料の体積を求めた。

測定方法

帯磁率異方性の測定には神戸大学発達科学部に設置の AGICO 社製、KAPPABRIDGE KLY-3S を使用した。測定プログラムは SUSAR を使用した。また全岩の帯磁率については、岩石の粉末試料を用いて BISON 社の帯磁率計 Model 3101A でも測定した。

帯磁率異方性の測定に用いた試料は20地点 (第2図) で合計169試料を採取した。今回は本岩体に分布する主要岩相をすべて網羅し、かつ新鮮な岩石を厳選して採取した。

測定結果

第1表に測定結果を示す。帯磁率異方性楕円体の形状を表す各種パラメータや信頼角は Jelínek (1981) に従って計算した (第1表)。

帯磁率についてみると、測定した試料のほとんどは中粒花崗岩の1試料 (サイト17) を除き、 40×10^5 SI UNIT 以下の低い値を示す。細かく見ると、斑状花崗岩は他の岩相と比較して 100×10^5 SI UNIT 以上の高い値を示す (サイト12, 13, 15)。

線構造と面構造の発達の度合いは、それぞれ $L (=K_1 / K_2)$ 、 $F (=K_2 / K_3)$ で表される。L を magnetic lineation、F を magnetic foliation という。これらの値はすべて1以上の数字をとり、この数値が大きいほど線構造、あるいは面構造の発達がよいことを示す。

帯磁率異方性楕円体の形状を表すパラメータとして異方度 (P') と楕円体の形状 (T) が得られる。第9図に P' と T の関係を示す。 P' は1以上の値をとり、大きいほど異方性が強いことを示す。これに対して、 T は1から-1までの値をとり、1に近いほどそれが扁平 (パンケーキ型) (oblate) であることを表し、-1に近いほど扁長 (葉巻型) であることを示す。ほとんどのサイトで T は0~0.5以内に納まり、帯磁

| Site | N | Km ($\times 10^{-5}$) | L | F | P' | T | K_{max} | | | | K_{int} | | | | K_{min} | | | |
|------|----|----------------------------|-------|-------|-------|--------|-----------|------|------|------|-----------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| | | | | | | | Dec | Inc | S1 | S2 | Dec | Inc | S1 | S2 | Dec | Inc | S1 | S2 |
| 1 | 6 | 40.8 | 1.048 | 1.033 | 1.085 | -0.177 | 61.0 | 16.4 | 80.9 | 25.6 | 319.4 | 34.4 | 80.9 | 23.2 | 172.2 | 50.8 | 27.0 | 24.2 |
| 2 | 12 | 5.3 | 1.008 | 1.011 | 1.020 | 0.054 | 82.1 | 8.5 | 77.2 | 15.1 | 348.9 | 20.6 | 77.2 | 17.0 | 193.2 | 67.6 | 18.7 | 12.9 |
| 3 | 9 | 14.0 | 1.026 | 1.029 | 1.057 | 0.068 | 261.9 | 23.7 | 58.1 | 21.9 | 1.0 | 19.9 | 57.6 | 28.3 | 126.8 | 58.3 | 33.8 | 18.9 |
| 4 | 6 | 8.7 | 1.036 | 1.032 | 1.071 | 0.077 | 288.4 | 23.6 | 35.6 | 13.1 | 191.0 | 16.5 | 67.4 | 35.3 | 69.2 | 60.6 | 67.4 | 9.8 |
| 5 | 8 | 11.5 | 1.004 | 1.007 | 1.011 | 0.161 | 115.3 | 5.4 | 32.0 | 14.3 | 25.1 | 1.9 | 31.0 | 9.8 | 276.3 | 84.3 | 17.3 | 9.3 |
| 6 | 8 | 4.5 | 1.007 | 1.014 | 1.022 | 0.329 | 133.9 | 9.7 | 23.4 | 12.5 | 225.6 | 9.9 | 26.1 | 20.1 | 0.3 | 76.1 | 26.6 | 15.6 |
| 7 | 10 | 6.7 | 1.009 | 1.013 | 1.022 | 0.152 | 255.4 | 1.1 | 38.3 | 14.5 | 346.0 | 28.0 | 38.3 | 19.7 | 163.3 | 62.0 | 20.3 | 13.6 |
| 8 | 8 | 6.2 | 1.007 | 1.009 | 1.017 | 0.085 | 253.6 | 10.4 | 20.6 | 13.3 | 347.5 | 20.3 | 37.5 | 14.3 | 138.0 | 66.9 | 37.9 | 16.1 |
| 9 | 6 | 12.1 | 1.002 | 1.004 | 1.007 | 0.181 | 44.0 | 47.1 | 61.6 | 17.3 | 274.2 | 30.7 | 61.7 | 9.4 | 166.8 | 26.7 | 17.8 | 12.7 |
| 10 | 8 | 4.2 | 1.007 | 1.016 | 1.023 | 0.358 | 9.0 | 23.3 | 52.0 | 14.2 | 277.8 | 2.6 | 51.9 | 23.1 | 181.7 | 66.6 | 28.7 | 16.3 |
| 11 | 9 | 22.8 | 1.113 | 1.505 | 1.846 | 0.292 | 2.4 | 32.6 | 50.9 | 17.8 | 101.5 | 14.0 | 68.0 | 28.3 | 211.4 | 53.8 | 67.1 | 29.2 |
| 12 | 6 | 95.0 | 1.039 | 1.060 | 1.105 | 0.273 | 329.5 | 40.3 | 25.0 | 10.8 | 61.4 | 2.2 | 26.2 | 13.0 | 154.0 | 49.6 | 20.0 | 5.8 |
| 13 | 8 | 210.2 | 1.028 | 1.040 | 1.073 | 0.169 | 179.9 | 0.8 | 56.3 | 8.8 | 270.0 | 12.3 | 56.4 | 10.8 | 86.2 | 77.6 | 11.9 | 8.5 |
| 14 | 8 | 11.6 | 1.022 | 1.030 | 1.055 | 0.013 | 244.5 | 3.0 | 32.1 | 26.1 | 336.5 | 34.5 | 61.9 | 27.9 | 150.1 | 55.4 | 62.9 | 11.1 |
| 15 | 5 | 115.8 | 1.008 | 1.031 | 1.042 | 0.570 | 158.4 | 1.9 | 26.9 | 5.9 | 249.2 | 21.1 | 27.7 | 5.1 | 63.5 | 68.8 | 10.7 | 5.8 |
| 16 | 6 | 45.1 | 1.029 | 1.063 | 1.098 | 0.336 | 322.4 | 15.9 | 23.4 | 15.0 | 230.8 | 5.6 | 23.2 | 20.5 | 122.0 | 73.1 | 20.8 | 15.0 |
| 17 | 5 | 124.1 | 1.016 | 1.042 | 1.061 | 0.439 | 46.4 | 3.9 | 21.0 | 5.5 | 316.3 | 2.0 | 20.1 | 10.5 | 199.6 | 85.6 | 11.4 | 9.3 |
| 18 | 6 | 4.8 | 1.005 | 1.013 | 1.019 | 0.276 | 226.7 | 1.4 | 59.0 | 11.8 | 317.3 | 24.4 | 58.8 | 23.7 | 133.6 | 65.6 | 30.4 | 14.6 |
| 19 | 6 | 12.6 | 1.004 | 1.008 | 1.012 | 0.331 | 253.9 | 8.7 | 31.8 | 13.0 | 349.9 | 34.3 | 31.9 | 13.3 | 151.7 | 54.3 | 15.0 | 11.6 |
| 20 | 6 | 3.6 | 1.011 | 1.012 | 1.024 | 0.116 | 1.4 | 15.3 | 59.3 | 4.1 | 94.1 | 9.9 | 59.5 | 4.9 | 215.7 | 71.6 | 14.2 | 3.3 |

第1表 防府花崗岩体における帯磁率異方性の測定結果

N: 測定試料数; Km: 全岩帯磁率 (の平均値); L: 磁気線構造 (の平均値); F: 磁気面構造 (の平均値); P': 異方度 (の平均値); T: 楕円体の形状パラメーター (の平均値); K_{max} , K_{int} , K_{min} : 帯磁率異方性楕円体における最大, 中間, 最小磁化方向の平均方位と傾斜; S1, S2: 95%信頼角の最大および最小値.

粗粒花崗岩 (1, 3, 4, 14), 中粒花崗岩 (2, 6, 7, 8, 10, 16, 17, 18), 斑状花崗岩 (12, 13, 15), 花崗閃緑岩 (5, 9, 11, 19), 細粒花崗岩 (20).

Table 1 AMS data of the Hofu granite

N: number of specimens; Km: bulk susceptibility (arithmetic mean of Km) L: lineation F: foliation P': corrected degree of anisotropy; T: Shape parameter; K_{max} , K_{int} and K_{min} : declination and inclination of maximum, intermediate, minimum principal axis of AMS ellipsoid, respectively; S1, S2: Semiangles of the major and minor semiangles of the 95% confidence ellipse, respectively.

Coarse-grained granites (1,3,4,14), Medium-grained granites (2,6,7,8,10,16,17,18), Porphyritic granites (12,13,15), Granodiorite (5,9,11,19), Fine-grained granites (20).

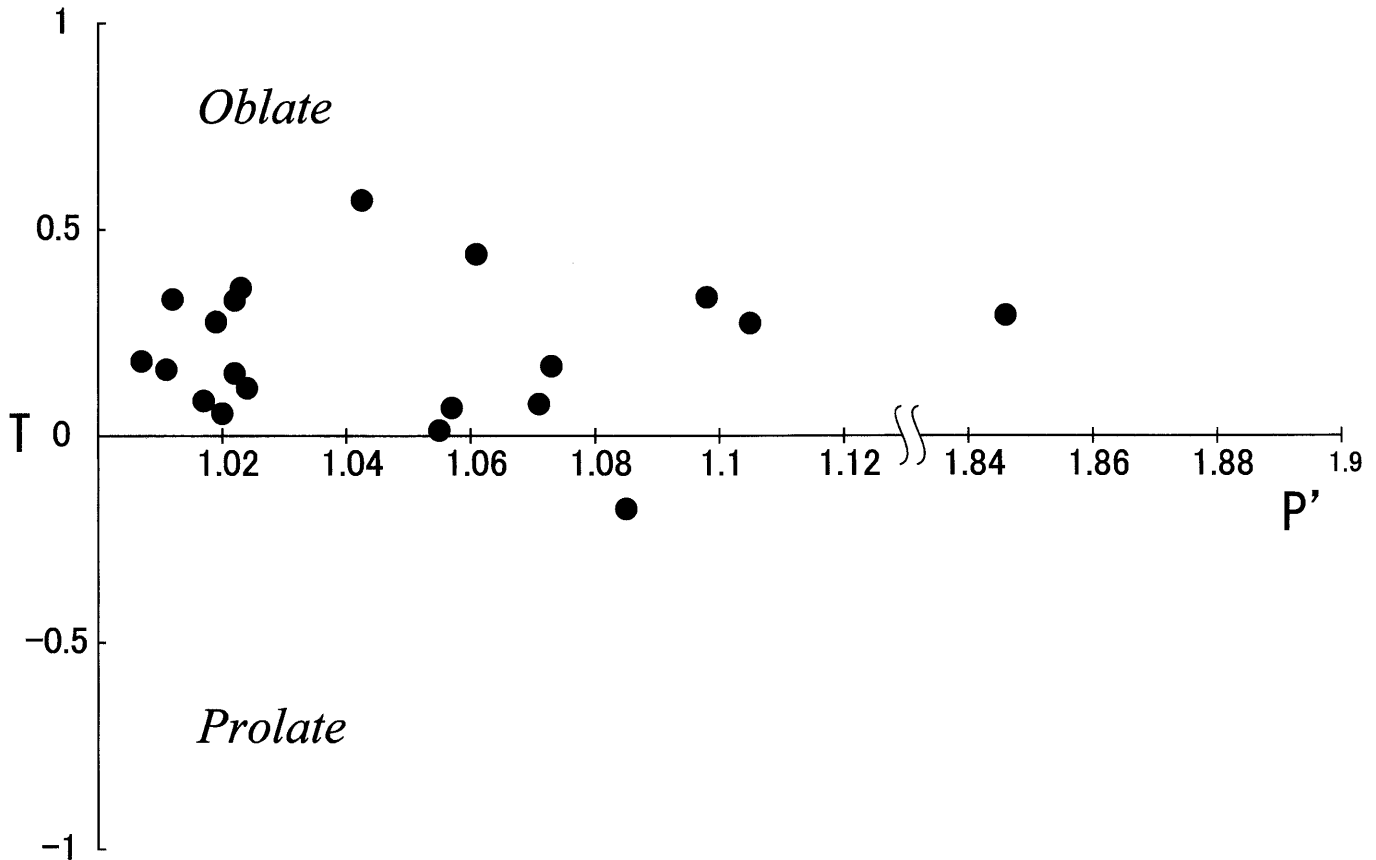
率楕円体の形状が扁平な形を示す。P' はほとんどが1.1までの小さい値を示し、異方度は弱い。1サイト (no. 11) のみ1.8を超えるものが認められた。このサイトの試料はステレオ図上でも K_{max} が集中し、 K_{int} , K_{min} が1つの楕円状に分布するようなパターンを示し、他のサイトとは異なっている。その異方度が高い試料は楕円体の形態を示す T 値が正の値を示しており、面構造の発達と考えられる。二次的な変形を受けた岩石ではしばしば T 値は正の値を示す (Bouchez 1997) ので、今後注意深い検討を必要とする。

測定結果のステレオ投影図を第10図に示す。第10図の95%信頼度円は、小円の範囲内に真の平均方向が存在する確率が95%であることを意味する。ステレオ図を見ると、 K_{min} , K_{int} , K_{max} がそれぞれ集中してプロットされるもの (nos. 5, 6, 7, 8, 12, 15, 16, 17, 19), K_{min} だけが高角度に集中し、 K_{int} や K_{max} が大円状に分布するもの (nos. 1, 2, 3, 9, 10, 13, 18), K_{max} だけが集中し、 K_{min} , K_{int} が大円状に分布するもの (nos. 4, 14) がある。

測定結果から得られた K_{max} の平均的方向を地質図上にプロットしたものを第11図に示す。矢印は下向きの方角を示すように表示している。粗粒花崗岩の K_{max} の向きは no. 3, 4, 14 ではいずれも西に3~24°の緩い下向きの方角を示し、no. 1 の試料では、東に16°傾斜する。中粒花崗岩の K_{max} の

向きは基盤との境界付近の試料 (no. 6) を除き北東-南西方向でいずれも23°以下の緩傾斜を示すものが卓越する。斑状花崗岩の K_{max} の向きは南北方向でほぼ水平、あるいは北に40°下向きに傾斜を示す。花崗閃緑岩ではとくに卓越した方向が見られないが、33°以下の緩傾斜を示す。細粒花崗岩の K_{max} の向きは北に15°上向きの方角を示す。本地域の花崗岩類の K_{max} の向きは全体的に見ると、北東-南西走向で、2~24°の緩やかな傾斜を示すものが卓越し、30°を超えるものが、周防変成岩との境界部で3サイト見られた。

測定結果から得られた K_{min} の平均方向がポールとなる面の走向・傾斜を第12図に示す。粗粒花崗岩はいずれも北東-南西走向のものが多く、北西に22~40°傾斜する。中粒花崗岩も基盤との境界付近の試料 (第1表, no. 6) を除き全て北東走向あるいは東西走向が卓越し、西あるいは北に4~28°傾斜する緩い面構造を示す。斑状花崗岩の面構造は南北あるいは北東-南西走向で、北あるいは西に12~40°の傾斜を示す。花崗閃緑岩の面構造の走向は北東-南西で北西に36°, 53°傾斜するが、周防変成岩との境界付近では南北走向で東に6°傾斜するものと、北西-南東走向で、東に36°傾斜するものがある。細粒花崗岩の面構造は北西-南東走向で、北東に18°の傾斜を示す。以上の結果から、本地域の花崗岩類には全体的に西あるいは北西の方角へ4~40°の低~中角



第9図 山口—防府地域の花崗岩の異方度 (P') と帯磁率楕円体の形状 (T) の関係

Fig. 9 Relationship between the degree of anisotropy (P') and shape parameter (T) of the granitoids in Yamaguchi-Hofu district, Yamaguchi Prefecture

度の傾斜をもつ面構造が卓越している。

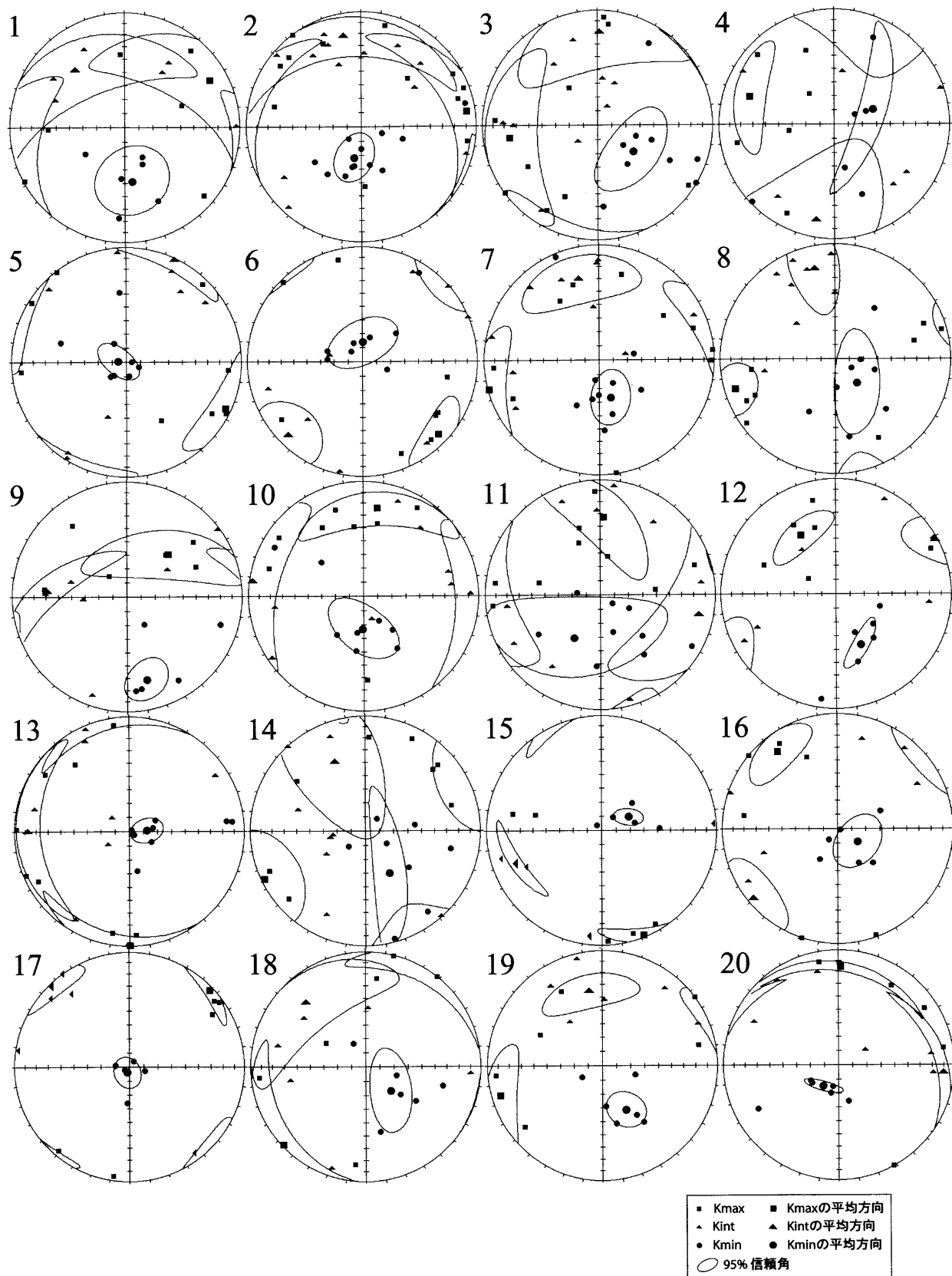
これらの結果は、野外調査の結果明らかとなった地質構造とも調和的である。すなわち佐波川の西側では、中粒花崗岩の上位に粗粒花崗岩が、佐波川の東側では、中粒花崗岩の上位に花崗閃緑岩、さらにその上位に細粒花崗岩がシート状に重なることが帯磁率異方性でも確認された。また、帯磁率異方性のデータからは、斑状花崗岩が粗粒花崗岩の上位に重なる可能性も示唆される。

花崗岩の帯磁率異方性に大きく影響を与えるのは磁鉄鉱などの強磁性鉱物である (安間 2003)。花崗岩中では、磁鉄鉱は初生的なものとして二次的に生ずるものがある。磁鉄鉱が少ない場合、イルメナイトや黄鉄鉱も帯磁率に寄与する。防府花崗岩体の場合、帯磁率異方性に寄与する磁性鉱物は、斑状花崗岩の全試料、および粗粒花崗岩や中粒花崗岩の一部の試料については磁鉄鉱、イルメナイトあるいは両者と考えられる。その他の試料については花崗岩中に含まれている可能性のある極めて少量の磁鉄鉱なのか、黒雲母や角閃石などの常磁性鉱物なのか、二次的に形成された黄鉄鉱なのか、あるいはそれらが複合した結果なのかについては明らかにすることができなかった。しかし黒雲母の方向と磁鉄鉱やイルメナイトの

並びが非調和ではないので、たとえそれらの鉄鉱物が二次的に形成されたとしても、マグマの初生的な粒子配列を乱すものではない。後述のように観察される花崗岩の構造と AMS がほぼ整合的であることからインバースの帯磁率異方性をもつ鉱物 (例えば、電気石、堇青石、単磁区の磁鉄鉱) の寄与は見込まれず、AMS 組織は岩石組織を忠実に反映していると判断される。今後、常磁性鉱物と強磁性鉱物の寄与率を注意深く扱って、例えば、強磁性が寄与しているものを排除して鉱物の定方向配列に起因するものだけを取り出すなど、より詳細に検討していく予定である。

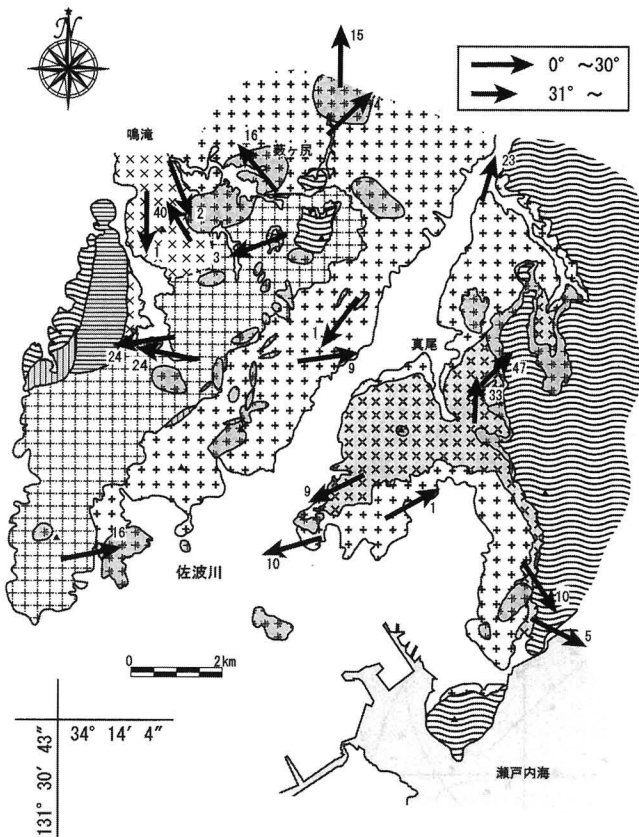
防府花崗岩体の貫入・定置機構について

既述のように花崗岩マグマの地殻上部への貫入・定置機構に関してはいくつかのモデルが唱えられている。主要なモデルは、ダイアピル、バルーニング、ストーピング、割れ目充填および部分帯融解である (Hutton 1996; 高橋 1997)。それぞれのモデルについて簡単に述べる。ダイアピルとは低密度層の上に高密度の層を重ねておくと、やがて不安定となり両者の境界部に凹凸が生じ、凸状態になった低密度層が成長して熱気球のようになって上昇することである (Marsh 1982;



第 10 図 測定試料のステレオ投影図

Fig. 10 Stereographic projections of measured samples

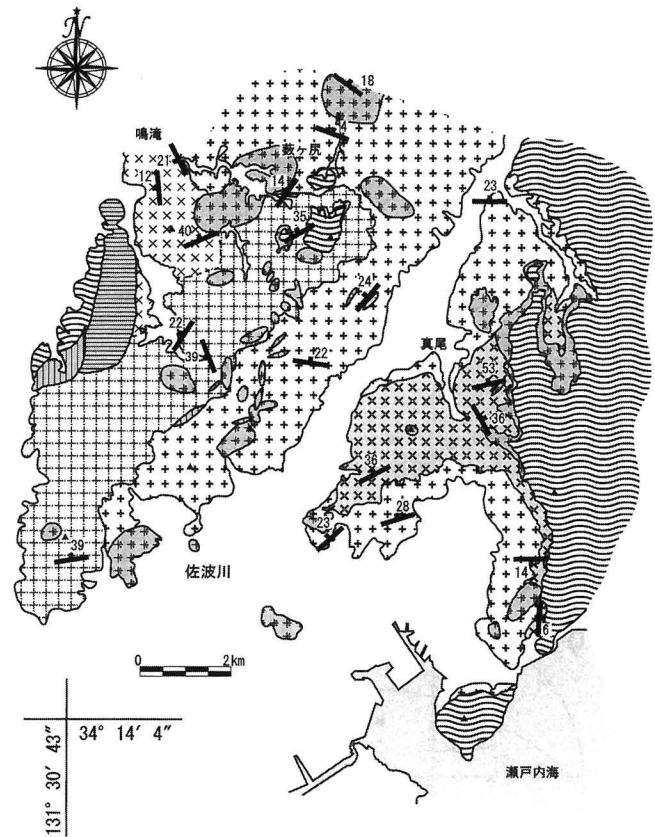


第 11 図 調査地域の花崗岩類の K_{max} 方向
矢印は下向きの方向を示すことに注意

Fig. 11 K_{max} directions of the granites in the study area
Arrows indicate downward direction.

Schmelling et al. 1988 ; Mahon et al. 1988 など). バルーニングとは風船が膨らむように、地殻中のある場所で、マグマが周囲の岩石を押し開けるように膨らみながら空間を確保しようとする現象である (Paterson and Vernon 1995 など). ストーピングはマグマ溜りが天井部をはがして取り込みながら上昇することである (Marsh 1982 ; 今岡 2001 ; Yoshinobu et al. 2003). 割れ目充填とは断層などの割れ目や垂直な開口割れ目とおしてマグマが輸送されることで、マグマで満たされた通路となる部分を feeder dike という (Cruden 1998; Wilson et al. 2000 など). 最後に部分帯融解とはマグマ溜り下底部で結晶化することによって潜熱を得、その熱で天井を融解させながらマグマ溜りが地殻中を上昇することである (Harris 1957).

本地域の主体をなす粗粒花崗岩と中粒花崗岩の岩相境界は狭い範囲で急激に変化し、両者は緩やかな傾斜をもつシート状の形態を示すことがわかった。さらに中粒花崗岩と花崗閃緑岩でもシート状の構造が明瞭に確認できる (第 2 図)。これらの構造的特徴は、山口県阿武地域の白亜紀花崗岩 (神谷 1974) や広島県下の広島花崗岩からも報告されている (高橋 1986 ; Hayashi 1995)。今回、AMS 法によって防府花崗岩体の特徴である塊状で無構造な岩石から得られた面構造や線構



第 12 図 調査地域の花崗岩類の K_{min} に垂直な面の走向・傾斜

Fig. 12 Strike and dip of vertical plane to K_{min} direction of the granites in the study area.

造は、緩やかな傾斜を示すことがわかった。このことは野外調査で得られた結果、粗粒花崗岩中に見られるシュリーレンの産状 (第 6 図) および扁平に伸張した MME の形態 (第 8 図) とも整合的である。以上の事実は、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。今後、岩体内に分布する MME の長軸方向の測定などを行い、それと AMS によるファブリックとの関係を議論したい。

これらのことをふまえながら防府花崗岩体がどのようなプロセスで形成したのか考えてみよう。

まず、ダイアピル・モデルやバルーニング・モデルは防府花崗岩のシート形態から最終的な定置様式としては考えにくい。さらに野外では大小の基盤を取り込んだ露頭は全く確認されず、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、ストーピング・モデルや部分帯融解モデルも除外される。

防府花崗岩体の場合、地下コールドロンのような上部地殻の陥没によって形成された空間にいくつかの岩脈によって供給されたマグマが上部地殻内で水平方向に拡がり、薄い板状形態をしたマグマが付加してシート状の構造を形成しているのではないかというモデルは検討に値する。岩脈によるマグ

マの上昇速度は粘性の高い花崗岩質マグマでも速く, マグマの輸送プロセスとしても効果的であり (Clemens and Mawer 1992 など), 防府花崗岩体のように巨大なバソリスを形成することも理解しやすい。防府花崗岩の活動には阿武層群の火山活動が先行しており, 地下コールドロンの形成を先行する大規模な珪長質マグマの噴出に求めることも可能である。さらに白亜紀火山岩と花崗岩の両者の成因関係が検討された例 (弓削ほか 1998; 今岡ほか 2001) では, 両者が同じ Sr 同位体比初生値をもつマグマに由来していると考えて良い。

以上のことから防府花崗岩体は, 現在構造的に水平方向に広がった部分を見ていることになり, この花崗岩の貫入機構としては割れ目充填モデルが妥当ではないかと考えている。防府花崗岩体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マグマが地下浅所で広がって形成されたもの, すなわち, Ameglio et al. (1997) の flat-floored pluton の形態を有する可能性が高い。

防府花崗岩体の地質図に重力異常のデータを重ねてみると岩体北端に強い負異常の目玉があるなど, 岩体の anomaly がよく出ており, マグマの供給口を含めた花崗岩体の下底面の形態が解明できる可能性がある (鳥根大学理工学部 小室裕明, 私信)。

南北に長い分布を示す防府花崗岩は, 本調査地域では, 完晶質等粒状の中粒花崗岩を最下位とし, 粗粒花崗岩, 斑状花崗岩, 花崗閃緑岩, 細粒花崗岩がシート状に重なり周防変成岩を基盤とする。一方, 本地域北方では細粒花崗岩や斑状花崗岩などのより浅成の岩石を主体とし, 周南層群中に貫入する。したがって, 防府花崗岩バソリスの南北断面は垂直方向に累帯した花崗岩体のより深部相から浅部相への断面を示すと考えられる。

結 論

本研究では, 花崗岩バソリスを構成する花崗岩の貫入・定置機構について考察するために, 白亜紀防府花崗岩を例としてその岩相変化と AMS を検討した。主要な結論は以下の通りである。

1. 防府花崗岩体は岩相によって粗粒花崗岩, 斑状花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑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ベ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。
2. 各花崗岩類の相互関係についてみると, 斑状花崗岩と粗粒花崗岩は漸移関係にあり, それに中粒花崗岩と花崗閃緑岩がシート状に貫入して, 最後に細粒花崗岩が貫入した。
3. AMS による面構造は, 西ないし北西に緩やかな傾斜を示し, 野外で推定される地質構造と調和的である。
4. 本地域の花崗岩類は flat-floored pluton の形態 (Ameglio et al. 1997) を有する可能性がある。

謝辞 本稿をまとめるにあたり, 高橋正樹 (日本大学文理学部), 安間 了 (筑波大学地球科学系), 金折裕司 (山口大学大学院理工学研究科) および B. P. Roser (鳥根大学総合理工学部), 中井陸美 (大東文化大学文学部) の各氏には原稿を読んでいただき大変有益なコメントをいただいた。中島和夫 (山形大学理学部) には不透明鉱物の産状について御教示いただいた。試料の AMS 測定にあたっては, 三宅 壮 (山口大学大学院理工学研究科) および菱田剛史 (山口大学理学部) の両氏にお世話になった。株式会社コンセックの多賀谷邦弘氏にはコアドリルの使用に際し有益なアドバイスを頂くとともに, 様々な便宜を図って頂いた。本研究に要した費用の一部は, 平成 17, 18 年度科学研究費補助金基盤研究 B (代表金折裕司) より支出された。以上の方々と関係機関に厚くお礼を申し上げます。

文 献

- Ameglio L, Vigneresse JL and Bouchez JL (1997) Granite pluton geometry and emplacement mode inferred from combined fabric and gravity data. In: Bouchez JL, Hutton DHW and Stephens WE (eds), *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*, 199-214. Kluwer Academic Publishers.
- 安間 了 (2003) 花崗岩の構造と貫入機構。資源環境地質学 (資源地質学会編), 179-190.
- Bateman R (1984) On the role of diapirism in the segregation, ascent and final emplacement of granitoid magmas. *Tectonophysics*, 110:211-231.
- Bouchez JL (1997) Granite is never isotropic: An introduction to AMS studies of granitic rocks. In Bouchez JL, Hutton DHW and Stephens WE (eds), *Granite: From Segregation of Melt to Emplacement Fabrics*, 95-112. Kluwer Academic Publishers.
- 地質調査所 (1992) 100 万分の 1 日本地質図 第 3 版。
- Clemens JD (1998) Observation on the origins and ascent mechanisms of granitic magmas. *Jour Geol Soc London*, 155: 843-851.
- Clemens JD and Mawer C (1992) Granite magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics*, 204: 339-360.
- Cruden AR (1998) On the emplacement of tabular granite. *Jour Geol Soc London*, 155: 853-862.
- Cruden AR, Tobisch OT 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.
- Harris PG (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 JL (1999) A multidisciplinary approach combining geochemical, gravity and structural data: implications for pluton emplacement and zonation. In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds), *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. *Geol Soc London Special Publications*, 168: 95-110.
- Hibbard MJ (1981) The magma mixing origin of mantled feldspars. *Contrib Mineral Petrol*, 76: 158-170.

- Hutton DHW (1996) The 'space problem' in the emplacement of granite. *Episodes*, 19: 114-119.
- 今岡照喜 (2001) 火山-深成複合岩体. 168-181. 地学ハンドブックシリーズ 13, 新版地質調査法 (山内靖喜・三梨 昂 編著) 地学団体研究会. 251p.
- 今岡照喜・永松秀崇・井川寿之・秋山美代・加々美寛雄 (2001) 火山活動と深成活動-西中国の例-. 月刊地球, 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, series C*, 8: 1-30.
- Ishihara S (1977) The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol*, 27: 293-305.
- 石原舜三 (1980) 花崗岩と流紋岩. 岩波講座地球科学, 15: 105-141.
- Ishihara S, Tanaka R, Nakagawa M and Goto Y (1995) Magnetic susceptibility of late Cenozoic volcanic rocks of east-central Hokkaido and the Kuril islands. *Resource Geol*, 18:217-228.
- IUGS Subcommission (1973) Plutonic rock, classification and nomenclature recommended by the IUGS Subcommission on the systematics of igneous rock. *Geotimes*, 18:26-30.
- Jelinek V (1981) Characterization of the magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: 63-67.
- 神谷雅晴 (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, 25: 105-118.
- 金丸龍夫 (2002) 帯磁率異方性を用いた浅所貫入岩のマグマ流動解析 (予察) -山梨県東部新第三紀小鳥山花崗閃緑岩の例-. 日本地質学会第109年学術大会講演要旨, 215.
- 金丸龍夫・高橋正樹 (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, 111: 458-475.
- 河野儀礼・植田良夫 (1966) 本邦産火成岩の K-A dating-(V) 西南日本の花崗岩類. 岩鉱, 56: 191-211.
- Marsh BD (1982) On the mechanics of igneous diapirism, stoping and zone melting. *Am Jour Sci*, 282: 808-855.
- Mahon KI, Harrison TM and Drew DA (1988) Ascent of a granitoid diapir in a temperature varying medium. *Am Jour Sci*, 282: 808-815.
- McNulty BA, Tobisch OT and Cruden AR (2000) Multistage emplacement of the Mount Givens pluton, central Sierra Nevada batholith, California. *Geol Soc Am Bull*, 112: 119-135.
- 中井睦美 (2000) 帯磁率異方性. 地球科学, 54: 279-280.
- 中井睦美 (2004) ジオロジストのための岩石磁気学. 地学双書 34, 地学団体研究会.
- Nishimura Y (1998) Geotectonic subdivision and areal extent of the Sangun belt, Inner Zone of Southwest Japan. *Jour Metamorphic Geol*, 16: 129-140.
- Paterson SR, Fowler Jr TH, Schmidt KL, Yoshinobu AS, Yuan ES and Miller RB (1998) Interpreting magmatic fabric pattern in pluton. *Lithos*, 44:53-82.
- Paterson SR and Vernon RH (1995) Bursting the bubble of ballooning plutons: a return to nested diapirs emplaced by multiple processes. *Geol Soc Am Bull*, 107: 1356-1380.
- Ramberg H (1970) Model studies in relation to plutonic bodies. In: Newall G and Rast N (eds), *Mechanism of Igneous Intrusion. Special Issue of the Geological Journal*, 2:261-286.
- 佐脇貴幸 (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, 91: 719-722.
- Schmelling H, Cruden AR 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.
- 高橋正樹 (1997) マグマの輸送. 岩波講座 8 地殻の形成, 72-79. 岩波書店, 260p. 東京.
- 高橋正樹 (2001) 花崗岩マグマ貫入定置機構論の現状と今度の課題 (演旨). 地学団体研究会総会 (山形) 講演要旨集, 55: 43-43.
- 高橋正樹・金丸龍夫・岡田 誠 (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, 30: 114-119.
- 高橋裕平 (1986) 大竹-津田地域の広島花崗岩類の岩石記載. 地調月報, 37: 507-514.
- 武田賢治・今岡照喜 (1999) 山口県白亜紀環状岩脈とコールドロン. 地質学論集, 55: 199-219.
- Tarling DH and Hrouda F (1993) *The Magnetic Anisotropy of Rocks*. Chapman & Hall, London, 217p.
- Wilson J, Ferre EC 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.
- Yoshinobu AS, Fowler Jr TK, Paterson SR, Llambias E, Tickyj H and Sato M (2003) A view from the roof: magmatic stoping in the shallow crust, Chita pluton, Argentina. *Jour Struct Geology*, 25: 1037-1048.
- 弓削智子・今岡照喜・飯泉 滋 (1998) 山口県阿武地域における白亜紀流紋岩類と全岩化学組成および Sr, Nd 同位体比. 地質雑, 104: 159-170.
- Zorpi MJ, Coulon C, Orsini JB and Cocirta C (1989) Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons. *Tectonophysics*, 157: 315-329.

山本慎一・今岡照喜・金丸龍夫・田結庄良昭. 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, 60, 415-429.

YAMAMOTO Shin-ichi, IMAOKA Teruyoshi, KANAMARU Tatsuo and TAINOSHO Yoshiaki. 2006. Petrography and anisotropy of magnetic susceptibility of Cretaceous Hofu granitic batholith, south-central Yamaguchi Prefecture, SW Japan: implication of emplacement mechanism. Earth Science (Chikyu Kagaku), 60, 415-429.

要 旨

花崗岩マグマの地殻上部への上昇・貫入・定置メカニズムを解明するためのツールとして, 帯磁率異方性 (AMS) が注目されている. 本研究では白亜紀防府花崗岩バソリスについて岩相変化, 岩石記載および帯磁率異方性について予察的に検討した. 防府花崗岩体は, その岩相によって, 粗粒花崗岩, 斑状花崗岩, 中粒花崗岩, 花崗閃緑岩および細粒花崗岩の5タイプに区分される. 粗粒花崗岩は佐波川より西側にのみ分布し, 中粒花崗岩に貫かれ, その構造的上位にある. 両者はシート状の形態を示す. 斑状花崗岩は粗粒花崗岩と漸移する. 中粒花崗岩は佐波川を挟んで最も広い分布域を有し, 均質な黒雲母花崗岩からなる. 花崗閃緑岩は佐波川東部に分布し, 中粒花崗岩の上位にシート状に載っている. 細粒花崗岩は小規模な分布を示し, 上記花崗岩を高角で貫いているところと, 周防変成岩の直下にシート状に貫入しているところがある.

帯磁率異方性の測定は神戸大学発達科学部で行い, KAPPABRIDGE KLY-3Sを使用した. その結果, 花崗岩は西あるいは北西に緩やかな傾斜をもつ面構造と緩やかな傾斜を示す線構造をもつことがわかった. このことは野外調査で得られた結果と整合的である. 複合シート状の構造は地下深部より上昇してきたマグマが地下浅所で広がって形成されたもので, Ameglio et al. (1997) の flat-floored pluton の形態を有する可能性が高い.