

原著論文

ジルコン結晶形態からみる鹿児島県大隅半島南部の花崗岩体の冷却パターン

池田咲子¹・能美洋介²

Cooling patterns of the Granitic magma by Zircon crystal form
in the southern part of Osumi Peninsula, Kagoshima Prefecture, SW Japan

Sakiko IKEDA¹ and Yousuke NOUMI²

Abstract: Zircon is normally included in acidic igneous rocks, in particular granite. According to a preceding study, the zircon crystallized in the magma indicates systematic crystal morphology reflecting temperature and chemical composition of the magma. The granitic complex are intruded in the Nichinan Group of Shimanto belt, in southern part of Osumi Peninsula, Kagoshima Prefecture. The zircon crystal form found there was investigated in the granitic complex, and then the temperature and chemical composition change was estimated for the magma using the model in the reference. As a result, the low temperature type zircon mainly appeared, and the crystal form descriptions were divided into 3 patterns, leading to our estimation of the cooling process of the granitic complex magma in Osumi Peninsula.

I. はじめに

関東から九州の西南日本は中央構造線を境に日本海側を西南日本内帯、太平洋側を西南日本外帯と呼ばれている。西南日本外帯には白亜紀から新第三紀の付加体である四万十帯、ジュラ紀付加体の秩父帯などが分布しており、その中に花崗岩体が点在していることが知られている。

鹿児島県南部の大隅半島には古第三紀の四万十帯日南層群が分布し、この中に花崗岩が貫入している。大隅半島の花崗岩体は、西南日本外帯において地表露出面積が最大であり、貫入岩体の岩相区分が山本ほか(1983)によってなされている。花崗岩は日本に広く存在し、島弧地殻を構成する岩石として一般的である。したがって、日本列島の成り立ちを研究する上で、外帯の花崗岩が付加体中に貫入定置し

た過程を明らかにすることは重要である。

本研究では、大隅花崗岩体に含まれるジルコン結晶形態を解析することで、大隅花崗岩体がどのように定置し冷却されたのかを検討した。

II. 研究地概要

研究対象とした花崗岩体は九州南部の鹿児島県大隅半島南東部、南大隅町、肝付町を中心としてバソリス状を呈する。今回の研究地である大隅花こう岩体は大庭(1960)においては南大隅花崗岩、山本ほか(1983)においては大隅花崗閃緑岩体と呼ばれるが、ここでは大隅花崗岩体とする。この岩体の地表分布面積は東西約15km、南北約48kmで、西南日本外帯に産する花崗岩中では最大である。大隅花崗岩体は日南層群の構造とほぼ平行に北東—南西方向に延び

1. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学大学院総合情報研究科生物地球システム専攻 Biosphere-Geosphere System Science, Graduate School of Informatics, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.

2. 〒700-0005 岡山県岡山市北区理大町1-1 岡山理科大学生物地球学部生物地球学科 Department of Biosphere-Geosphere System Science, Faculty of Biosphere-Geosphere, Okayama University of Science, 1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama-shi, Okayama-ken 700-0005, Japan.

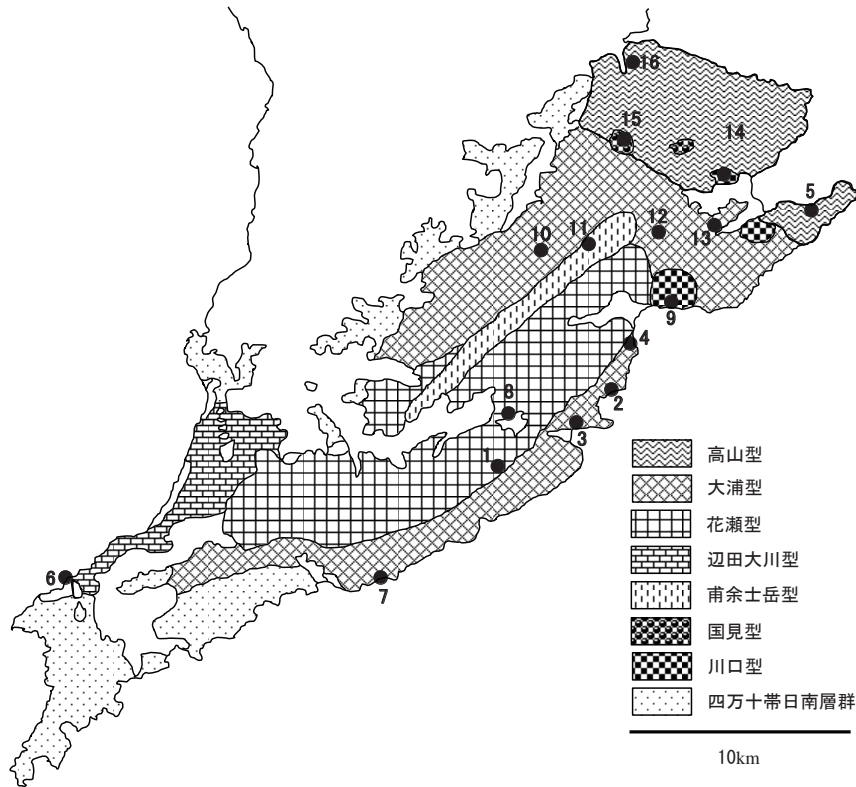


図1. 大隅各岩体岩相区分とサンプリング地点(山本 1992を一部改変)。

て分布している。山本ほか(1983)によれば、日南層群と大隅花崗岩体との境界面は、岩体の外側に向かって傾斜しており、その傾斜は西部では急で、南部ではやや緩やかになっている。また、本岩体は更新世～完新世の火砕流に覆われる。

大隅花崗岩体は、明色～暗色、粗粒～細粒、等粒状～斑状の花崗閃緑岩～花崗岩からなる不均質な岩体である。山本ほか(1983)は、大隅花崗岩体を主に粒度およびマフィック鉱物の種類と相対的存在量に基づいて7つの岩型に区分した(図1)。主要な岩体としては辺田大川型、大浦型、高山型、花瀬型岩類があり、さらに小規模岩体として川口型、甫余志岳型、国見型岩が区分された。国見型を除いていずれの岩相も黒雲母花崗閃緑岩もしくは黒雲母花崗岩である。山本(1992)より各岩型の特徴は次のように記載されている。辺田大川型は大隅花崗岩の南西部の周縁に分布しており、細粒～中粒のやや斑状を示す。大浦型は本岩体西部・東部の周縁に分布し、細粒～中粒で斑状～やや斑状を呈する。高山型は本岩体北部の周縁に分布しており、中粒の斑状～やや斑

状を示し、花瀬型は岩体の中心部に現れ、中粒～粗粒の斑状～等粒状を示す。川口型は内之浦地域にのみ分布し、細粒～粗粒の斑状～やや斑状を示す。甫余志岳型は岩体中央部のマイロナイト帯にはさまれており、細粒～中粒の斑状を示す。国見型は他の型と異なり、細粒の白雲母黒雲母アプライト質花崗岩で、多量の捕獲岩を含む。

また、大隅花崗岩の岩相・構造、化学的性質に基づいて、日南層群に貫入した際にはマグマの分化を行いながら比較的安定な地質条件でかつ相互に反応しながら地下の比較的浅いところに貫入しており、高温固結したものと考えた(大庭 1960)。

III. ジルコン結晶形態の記載法

1. Pupin(1980)のジルコン結晶分類

Pupin(1980)は花崗岩質マグマから晶出するジルコン結晶の柱面および錐面の出現割合による結晶形態分類図を提案した。縦軸に柱面の出現割合、横軸に錐面の出現割合を配し、それぞれを8つに分類することで、ジルコン結晶形態を64種類に分類した

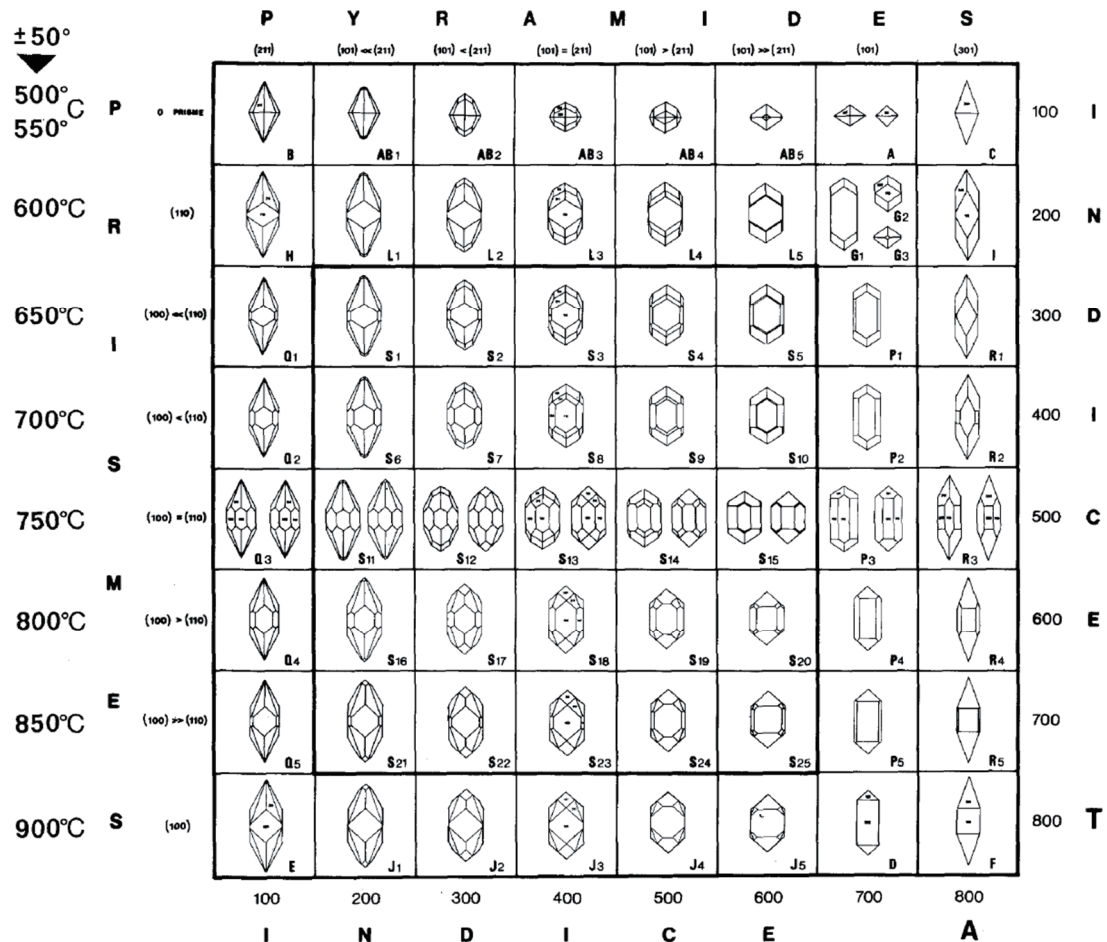


図2. ジルコン結晶形態分類図(Pupin 1980).

(図2). 花崗岩中に高い頻度で出現する柱面{100}と{110}, 錐面{101}と{211}の結晶面から構成されるものは25種類に分けている. 縦軸と横軸はそれぞれINDICE TおよびINDICE Aとして, 100から800の指数がつけられており, ジルコン結晶をこの分類図に当てはめることにより, 結晶形態の数値的な取り扱いを可能にしている. Pupinによると, 縦軸は晶出時のマグマの温度に関係しており, 温度が高いほど{100}の出現割合が高くなる. 横軸はジルコン結晶が含まれていた母岩の化学成分に関係しており, 塩基性であるほど{211}の出現割合が高くなると考えられている.

2. 林(1990)の数値的記載法

林(1990)はジルコン結晶形態を0~1の間の数値を用いて4つの指数(柱面指数Prism index, 錐面指数Pyramid index, 伸長指数Elongation index, 扁平指数

Flatness index)で表現する方法を開発した. この方法は, ジルコン結晶が正方晶系であり, 柱面は{100}と{110}, 錐面は{101}と{211}が主に出現することを基礎としている. また, 鏡下でジルコン結晶を観察した時, 正面に見える柱面が{100}の時を{100}型, {110}を{110}型と呼び(図3), それぞれに対応した4つの指数の算出方法を与えた.

林の指数は, 顕微鏡を用いてジルコン結晶を撮影し, その画像を用いて頂点間の距離等から求めることができる.

3. Pupin(1980)と林(1990)の比較

能美ほか(1997)は, Pupin(1980)のジルコン結晶形態分類図に示されたジルコン結晶形を林(1990)の記載指数で表現した(図4). 林(1990)の指数のうち柱面指数PRを縦軸にとり下端を1.0とし, 錐面指数PYを横軸にとり左端を1.0にすれば, ある岩石試料

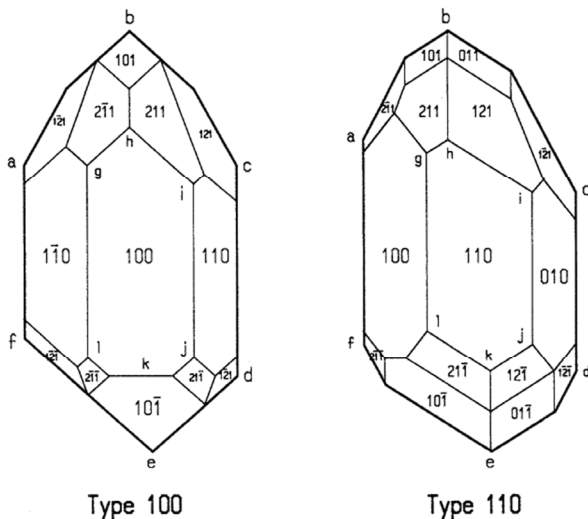


図3. {100}型と{110}型ジルコン結晶模式図(林 1990).

から得られるジルコン結晶群は、PYとPRの相関図(PY-PR図)として表すことができる。PY-PR図はPupin(1980)のジルコン結晶形分類図と対比でき、ジルコン結晶の数値記載結果からPupinのモデルを適用したマグマの冷却史を考察できる可能性があることが示唆されている。

IV. 研究方法

1. ジルコン結晶抽出・結晶形態記載指数

ジルコン抽出は次の手順で行った。初めに岩石試料3 kgをジョークラッシャーにより5 mm以下に粉碎しメッシュ番号#32(500 μ m)のふるいにより水洗いしながらふるい分けを行った。ふるいを通った試料から軽粒子を除去するため椀かけを行い、椀かけで残った試料は46%フッ化水素酸を用いて溶解させた。フッ化水素酸処理後の試料は再び椀かけして軽鉱物を除去し、さらにネオジウム磁石を用いて磁鉄鉱などを除去した。以上の残渣をオープン内において60℃12時間、水分が完全になくなるまで乾燥させ、スライドガラスの上に樹脂(エンテラン・ニュー)を載せた。その上から葉さじ(アズワン株式会社ミクロスパーテル)1杯分を残渣試料が重なり合わぬよう散布し、カバーガラスをかけて封入した。作成したスライドガラスを透過顕微鏡(株式会社ニコン Eclipse E600 POL)下で観察し、両端の錐面が確認できるジルコン結晶粒子100粒程度を無作為に選

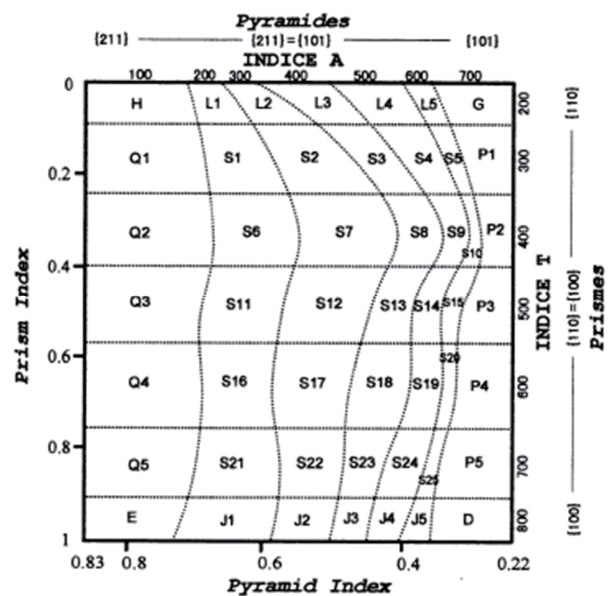


図4. ジルコン結晶形記載指数の対比(能美ほか 1997).

び、顕微鏡に取り付けたCCDカメラ(八洲光学工業株式会社 YCU-300F)を用いてデジタル写真を撮影した。撮影されたジルコン結晶の画像を用いて、林(1990)の記載法を適用した自作プログラムによって柱面指数(PR)と錐面指数(PY)を求めた。

2. 全岩化学分析

ジルコン結晶形態と化学成分との関係調べるため、サンプリングした花崗岩試料の主要元素について、蛍光X線分析による全岩化学分析を行った。本研究では粉末試料をガラスビートに封入して測定した。この方法では融剤である四ホウ酸リチウム($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$)を使用し、これを $3.6000 \pm 0.0002\text{g}$ と粉末試料 $0.40000 \pm 0.0002\text{g}$ を白金るつぼの中に入れ混ぜ合わせ、ビートサンプラー(日本サーモニクス株式会社 NT2000)により、昇温120秒、溶解150秒、ローリング120秒で試料を溶解し、ガラスビードを作成した。作成したガラスビードを波長分散型蛍光X線発生装置(株式会社リガク X-ray spectrometer リガク3070)において電圧40V、電流40Vの条件下で測定した。なお、標準試料として、JA-1, JB-1a, JB-3, JG-1a, JG-3, JGb-1, JR-1, JR-2(産業技術総合研究所地質調査総合センター)を用い、これらの測定結果から検量線を作成した。

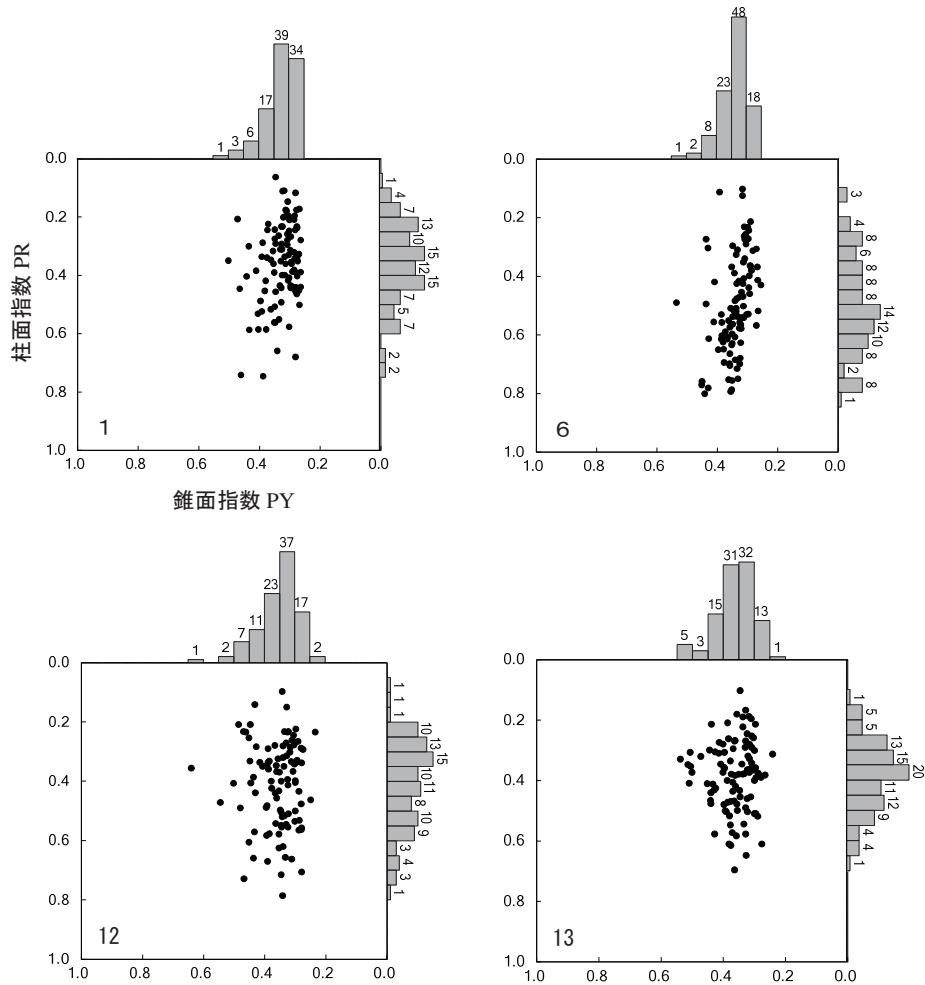


図5. A型を示す地点1, 6, 12, 13のPY-PR図.

V. 結果

1. ジルコン結晶形態記載指数

本研究では図1に示す全16地点でジルコン結晶形態記載用の岩石試料をサンプリングした。地点3(大浦型)以外の採取地点からは、C軸方向に伸びたジルコン結晶が多く出現した。得られたジルコン結晶形態の解析結果は能美ほか(2011)に従いPY-PR図で示し、さらにPYとPRの出現頻度を区間0.05のヒストグラムで示した(図5, 6, 7)。山本(1992)による岩相区分ごとの結果の概略を以下に記す。なお図5, 6, 7に示された各グラフの番号は地点番号を示す。一例として地点1は図5-1と示す。

(1)高山型

高山型のサンプリング地点は5と16である。これらの地点における結果は図7-5と16に示す。地点5はPR値0.10~0.30, PY値0.20~0.40付近にまと

まった分布を示すが、どちらの値も大きくなるにつれてバラつきが見られる。地点16は集中した分布が見られず、PR値0.10~0.70, PY値0.20~0.60の間において広がった分布が見られる。

(2)大浦型

大浦型のサンプリング地点は2, 3, 4, 7, 10, 12, および13である。これらの地点における結果は図5-12と13, 図6-2, 3および7, 図7-4と10に示す。地点2や7ではPR値0.10~0.20, PY値0.30付近からPR値0.80, PY値0.30~0.60付近に向かって広がった分布が見られたものの、本岩相内で共通した特徴が見られなかった。

(3)花瀬型

花瀬型のサンプリング地点は、1と8である。これらの地点における結果は図5-1と図7-8に示す。地点1は、PY値0.20~0.40付近にまとまっ

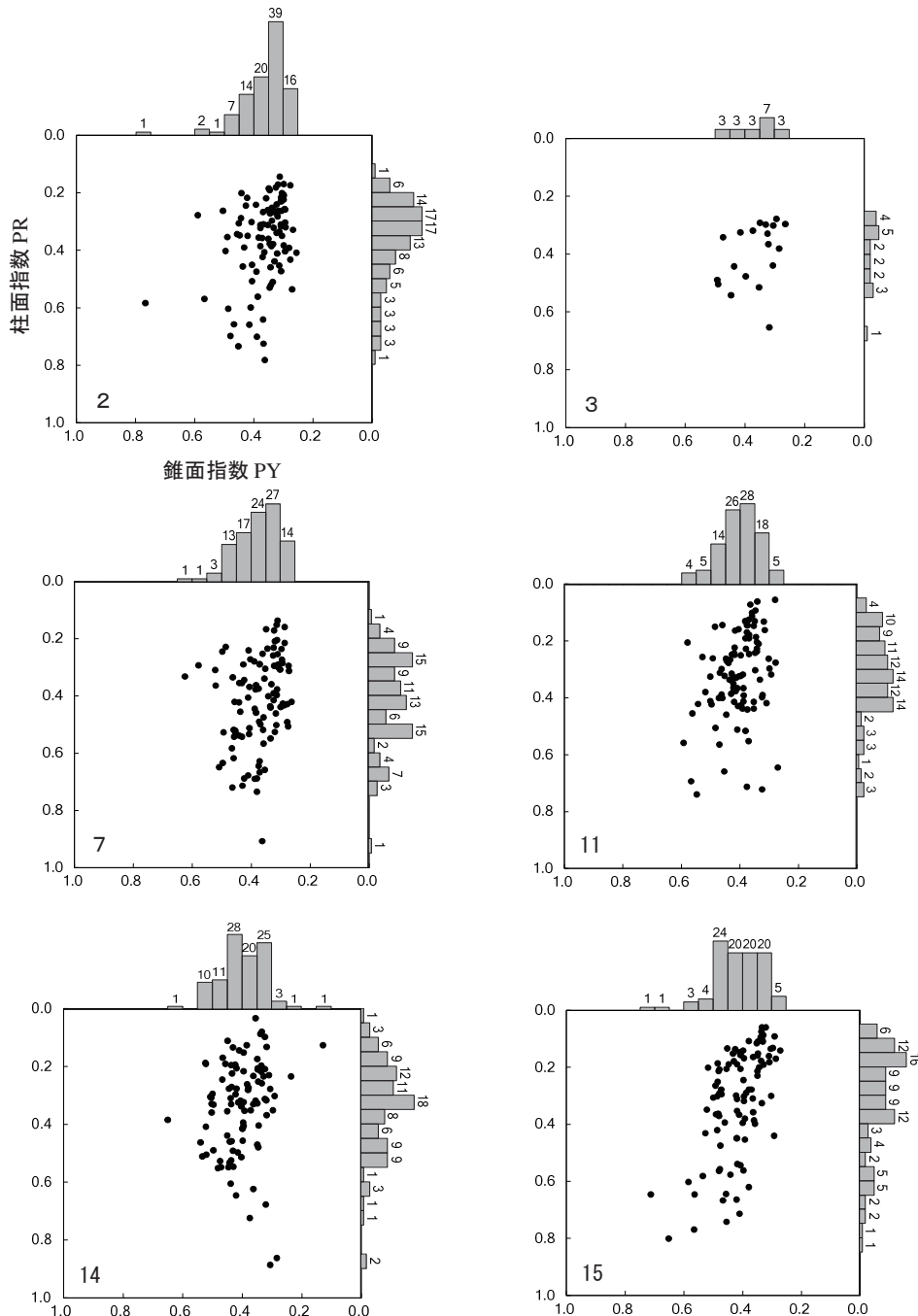


図6. B型を示す地点2, 3, 7, 11, 14, 15のPY-PR図.

た分布を示す。PY値の範囲は狭いが、PR値は0.10～0.80と範囲は広がっている。地点1のヒストグラムを図5-1に示すが、度数がPY値0.25～0.35の範囲ではかなり集中している。図7-8では度数がPY値0.25～0.50まで広がっており、同一岩相ではあるが共通した特徴は見受けられなかった。

(4) 辺田大川型

辺田大川型のサンプリング地点は地点6である。結果は図5-6に示す。地点6は、PY-PRの分布は

花瀬型の1と大変似た特徴があり、PY値の範囲は狭く、PR値の範囲は広い。少しばかり、バラついている分布が見受けられるが、細長い縦方向の分布が特徴的である。

(5) 川口型

川口型のサンプリング地点は地点9と14である。これらの地点における結果は図6-14と図7-9に示す。地点14と地点9では、どちらの地点も分布にPY値のバラつきが見られたが、PR値に関して地点

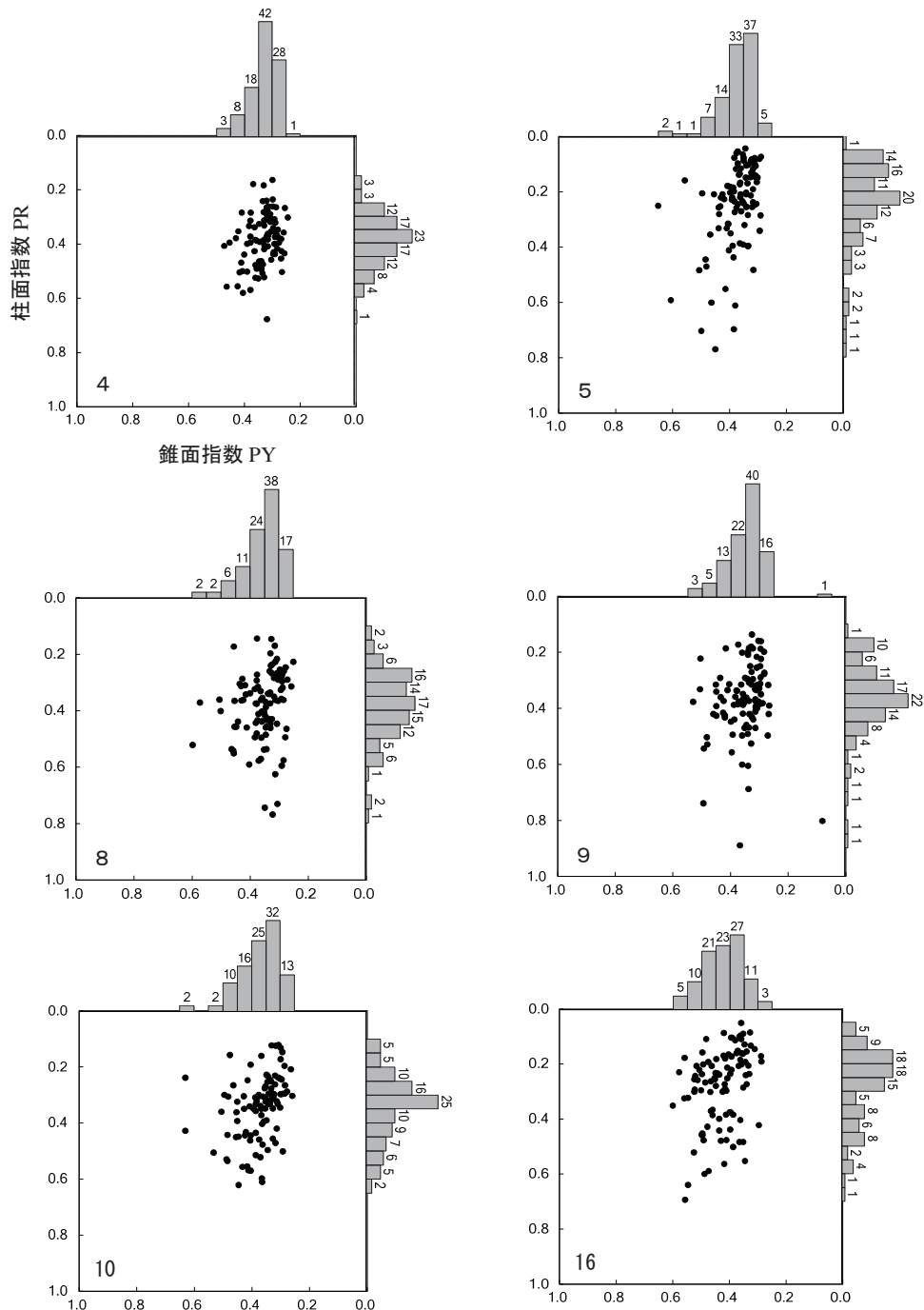


図7. C型を示す地点4, 5, 8, 9, 10, 16のPY-PR図.

9は0.30～0.50において分布が集中しており，地点14はどの値においても共通した度数が見受けられ，分布の集中度合いに違いが見られた。

(6) 甫余士岳型

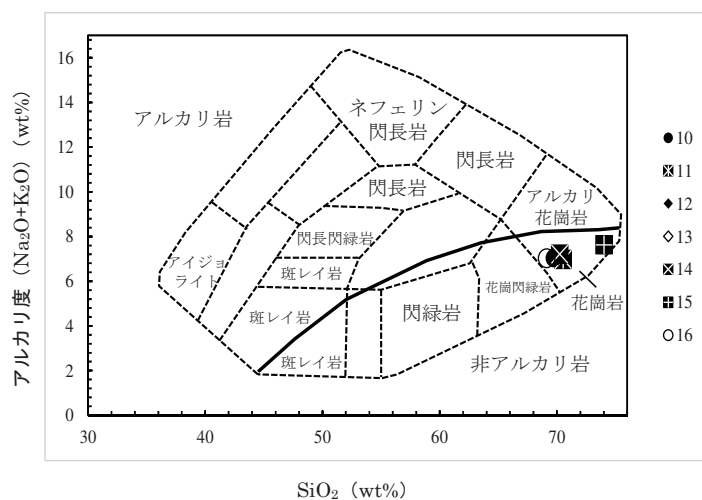
甫余士岳型のサンプリング地点は地点11である。結果は図6-11に示す。図6-14の地点14のように分布に動きがあるようなバラつきが見られる。ヒストグラムのPR値が小さくなるほど，分布の集中度合いが増している様子が示されている。

(7) 国見型

国見型のサンプリング地点は地点15である。結果は図6-15に示す。地点15は，他のサンプリング地点における結晶形記載結果とはやや異なり，PR値0.10～0.50と0.50～0.80で二つに分かれた分布を示している。甫余士岳型の地点11と同様に，地点15のヒストグラム(図6-11, 15)ではPR値が小さくなるほど分布の集中度合いが増している。

表 1. 全岩化学分析結果.

wt%	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	69.75	70.54	69.77	70.09	70.23	74.04	69.14
TiO ₂	0.68	0.72	0.67	0.73	0.75	0.41	0.84
Al ₂ O ₃	16.04	15.83	15.52	15.45	15.52	14.05	15.90
FeO*	1.38	1.45	1.41	1.51	1.57	0.78	1.76
MnO	0.067	0.072	0.066	0.074	0.076	0.036	0.072
MgO	1.28	1.35	1.28	1.37	1.42	0.52	1.61
CaO	3.06	3.08	2.55	2.49	2.91	0.72	2.63
Na ₂ O	2.71	2.71	3.20	2.98	3.15	2.36	2.95
K ₂ O	4.32	4.25	3.91	4.17	4.06	5.27	4.06
P ₂ O ₅	0.13	0.14	0.13	0.13	0.15	0.06	0.16
Total	99.43	100.16	98.50	99.01	99.84	98.25	99.11

図 8. アルカリ ((Na₂O+K₂O)-SiO₂) 関係図による火成岩分類 (K.G. Cox(1979), M.Wilson(1989)を一部改変).

2. 全岩化学分析

風化の傾向が見られない岩石試料が得られた地点10から16における全岩化学分析結果を表1に示す. この測定結果を基にアルカリ図を作成した結果, 分析地点すべてが花崗岩の範疇に分類されることを確認した(図8). 国見型の地点15の試料はアプライト質であり, 測定試料中SiO₂量が1番高い結果となった. 大浦型の地点10や甫余土岳型の地点11の結果は, 比較的CaO量が高い. 同様に大浦型の地点12は, 他に比べ, Na₂O量が高い結果が得られた.

VI. 考察

1. ジルコン結晶形態記載指数

Pupin(1980)によれば, PY-PR図の縦軸PRはジルコ

ン結晶が晶出時のマグマの温度と関係があり, PR値が高いほど高温であると考えられている. また, 横軸PYは母岩の化学成分と関係があり, PY値が高いほど塩基性であると考えられている. 図5, 6および7に示したPY-PR図をみると, 山本(1992)の岩相区分によらず, ジルコン結晶形態分布のパターンを3つに類型区別(それぞれA, B, C型と呼ぶ)することができる. 各ジルコン結晶形態出現型の特徴は以下のとおりである.

(1) A型

このタイプには地点1, 6, 12, 13の結果が相当する. このタイプのジルコン結晶形態の特徴は, PY-PR図では縦方向に細長い分布を示し, PY値は0.40あたりの狭い範囲に集中している. 一方, PR

値はヒストグラムからどの値にも同じような度数分布を示しており、分布の範囲が広い。このことは、各地点のヒストグラム(図5)にも示される。

Pupin(1980)の考えによれば、A型の分布はPY値より母岩の化学成分は酸性に偏り、温度降下に伴って化学成分の変化が見られないと言える。またPR値より高温から低温にかけて安定したジルコン結晶の晶出が認められるため、温度変化が比較的緩やかである安定したマグマ環境と冷却スピードだったのではないかと考えられる。これはA型を示す地点が比較的大隅花崗岩体の中心部に位置しており、マグマが貫入した際に母岩からの冷却影響が少なかったためであると考えられる。しかし、それぞれの地点の岩相は花瀬型、辺田大川型、大浦型と異なっており岩相とジルコン結晶形態記載指数との関連性は見受けられなかった。

(2)B型

このタイプには地点2, 3, 7, 11, 14, 15の結果が相当する。このタイプのジルコン結晶形態の特徴は、PY-PR図ではPY値とPR値が小さいところに分布が集中しており、値が大きくなるところに向かって分布がバラついている。PY値は0.20~0.80と比較的広い範囲に分布している。一方、PR値は0.20~0.50では分布が集中しており、0.50~0.90では分布が分散している。

Pupin(1980)の考えによれば、B型の分布はPY値より母岩の化学成分は塩基性から酸性へと移り変わる際に分布が増加している。またPR値より高温部への分布は少なく、低温部へ集中している。これより高温部から低温部、塩基性から酸性へと移り変わる際にジルコン結晶の晶出割合が高まっていると思われる。B型を示す地点は大隅花崗岩バソリスの周縁部に近い場所での岩体冷却パターンを示していると考えられるが、貫入した際に高温マグマが日南層群を溶融したと思われる。このため、化学成分に塩基成分の混じり合いが起こり、安定性が見られないと示唆できる。これよりB型ではマグマが日南層群への貫入の際に周縁部であったため急速に冷却され、溶融されたため塩基性由来のものが混ざったと

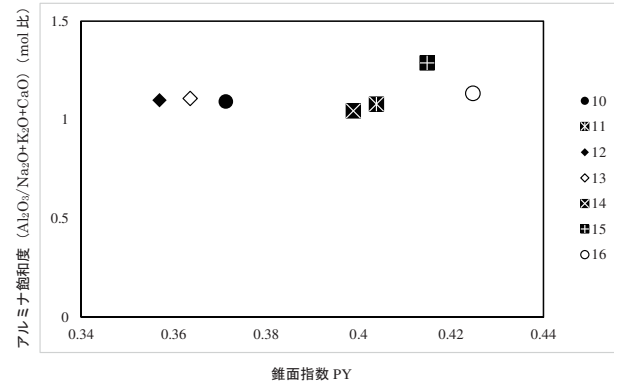


図9. 地点10~16のアルミナ飽和度と錐面指数PY.

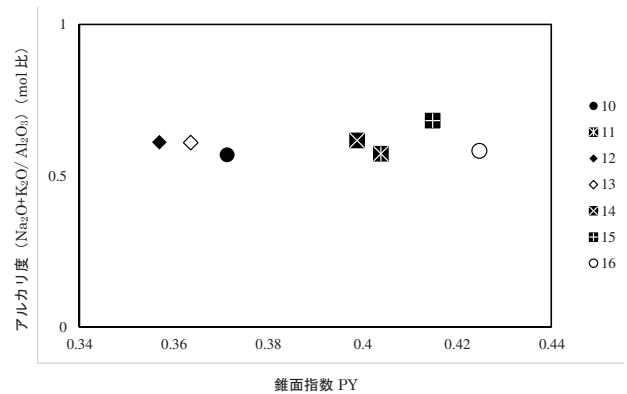


図10. 地点10~16 のアルカリ度と錐面指数PY.

考えられる。

(3)C型

このタイプには地点4, 5, 8, 9, 10, 16の結果が相当する。このタイプのジルコン結晶形態の特徴は、PY-PR図ではPY, PR値が共に0.20~0.50の範囲の小さいところに分布がまとまって集中している。

Pupin(1980)の考えによれば、C型の分布はPY値より酸性に偏った分布、PR値より低温部に集中した分布を示している。これよりC型は高温状態に分布が少ないことから、マグマが急冷されたため、低温部に集中した分布が得られたのではないかと考えられる。

2. 全岩化学分析

ジルコン結晶の錐面の発達には化学成分が関係していると考えられており、アルミナ飽和度が高いほど{101}面が、低いほど{211}面が出現しやすいと言

われている(Pupin 1980). 図9, 10は, それぞれ縦軸にアルミナ飽和度, アルカリ度, 横軸にPY値の平均との関係を示す. また, 地点12, 13はA型, 地点11, 14, 15はB型, 地点10と16はC型に当てはまる. これを見ると, ジルコン結晶形態記載指数に基づいて区別したタイプごとにPY値が一致していることが読み取れる. 岩体の中心部ほどアルカリ度が高く, 変化が少ないマグマ環境を示すと考えられるA型では, アルミナ飽和度やアルカリ度のばらつきは小さく, 化学的にも安定している(図9, 10). 一方, 岩体周縁部のB型では, これらの散布図の分布にまとまりがないことから, 局所的な母岩との同化作用の影響が推測される. また, B型のサンプリング地点で大隅花崗岩体中心部に近いものほど SiO_2 量が高い傾向が見られる(図8). このように, ジルコン結晶形態は岩相ごとの差異よりは, 貫入岩体内の母岩からの距離, もしくは冷却環境の違いを反映していると考えられる.

VII. まとめ

ジルコン結晶形態解析により, 大隅花崗岩体は3つのマグマの冷却パターンが想定された. 各サンプリング地点におけるマグマの冷却パターンの分布は岩体の周縁から中心部に向かってB型, C型, A型と分けられるが, 周縁ではこのパターンが崩れ, 場所によってはA型を示す地点が存在し, 花崗岩質マグマの段階的な貫入が想定される. 全岩化学分析結果ではジルコン結晶形態のパターンに関わらず, 中心相ほど SiO_2 が高い. また, 結晶分布のパターンが同じであるにも関わらずサンプリング地点によって SiO_2 量に違いが見られた. これらの結果はマグマの冷却過程の違いを反映したものと考えられる.

引用文献

- 林 正雄(1990). ジルコン結晶形態と地球科学への応用. 地質学雑誌 96, 2: 117-123.
- 能美洋介・弘原海清・升本眞二(1997). ジルコン結晶形態図の数値表現. 情報地質 8 3: 149-155.
- 能美洋介・武政恭平(2010). 足摺岬花崗岩体に含まれるジルコン結晶の数値記載. 岡山理科大学科学技術研究所年報 29: 23-28.
- 大庭 昇(1960). 南大隅花崗岩. 資源科学研究所彙報 52・53: 127-135.
- Pupin J.P. (1980). Zircon and granite petrology. Contribution of Mineralogy and Petrology 73: 207-220.
- 山本温彦・大庭 昇(1983). 高隈花崗岩体・大隅花崗閃緑岩体の地質・岩石. 日本地質学会第90年学術大会巡検案内書.
- 山本温彦(1992). 第2章新生界3. 4火成岩類(1) 深成岩類2. 九州外帯, 日本の地質9九州地方. 共立出版 117-183.

要旨

ジルコンは花崗岩をはじめとする酸性火成岩に普遍的に含まれており, 先行研究より花崗岩中に晶出するジルコンは晶出時のマグマの温度や化学成分を反映した系統的な結晶形態を示すと考えた. 本研究では鹿児島県大隅半島南部の四万十帯日南層群に貫入した花崗岩体に含まれるジルコン結晶形態の数値記載を行い, 先行研究のモデルを利用して花崗岩質マグマの定置時における温度や化学成分の遷移を推定した. 今回得られたジルコンの結晶形態は, 低温晶出タイプの形態を示す結晶が多く, ジルコン結晶形態の晶出パターンは3つに分けられ, これを用いてマグマの冷却過程を推定した.

(2017年1月6日受理)