

鹿児島県紫尾山花崗閃緑岩の結晶温度と岩石成因：ジルコンの結晶形状から推定

Crystallization temperatures and petrogenetic source of the Shibi-san granodiorite of Kagoshima prefecture

中林 真梨萌¹⁾・レーマン ハフィーズウル²⁾ *
Marimo NAKABAYASHI¹⁾, Hafiz Ur REHMAN²⁾ *

¹⁾ 鹿児島大学理学部 地球環境科学科

¹⁾ Department of Earth and Environmental Sciences, Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

²⁾ 鹿児島大学大学院理工学域 (理学系)

²⁾ Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

* 責任著者 e-mail address: hafiz@sci.kagoshima-u.ac.jp

Abstract: The Shibi-san granodiorite body is located in the Satsuma peninsula, northwest of Kagoshima. It represents one of the Outer Zone-type Miocene granitic rocks of Kyushu, that intruded into the Cretaceous sedimentary rocks of the Shimanto supergroup. In this study, we investigated zircon crystal shapes that were separated from the granodiorite samples to estimate the temperature of crystallization of magma. In addition, the zircon crystal typology was applied to assign a petrogenetic source to the granitic magma. In total, 629 zircon grains from 8 granitic samples were investigated for crystal shape and the estimated temperatures ranged between 650 and 850 °C, with overall average around 770 °C. Based on the zircon crystal typology, a sub-alkaline granitic source to the parent magma can be assigned.

Keywords: Shibi-san granodiorite, Outer Zone-type, zircon crystal shape, crystallization temperatures, magma source

1. はじめに

鹿児島県薩摩半島北部には、四万十累帯北部を貫く花崗岩帯が散点的に分布している。先行研究文献により、紫尾山花崗岩体の岩石記載的および地球化学的研究について数件の報告がなされた[1, 2, 3, 4, 5]。山本他[5]では全岩地球化学組成特に主要鉱物である角閃石と黒雲母の化学組成 (Si 原子量や Mg/Mg+Fe⁺² の比など) の差異に基づいて、紫尾山岩体の形成過程を平八重型と楠八重型の2種類に分けている。しかし、花崗岩の形成過程およびマグマの成因などの詳細は明らかにされていない。そこで私達は、地質調査を行い花崗岩体を観察し、採取した試料を岩石記載学的および花崗岩に含まれるジルコンの結晶形態および内部構造を検証した。

ジルコンは物理・化学的に非常に安定であり、風化の影響を受けにくいため、激しく風化した深成岩および砂岩など一度完全に分解された岩石中からも抽出が可能である。また、ジルコンは母岩の化学組成や晶出温度により、結晶形態が Fig. 1 のように変化すると知られている[6]。そのため、ジルコンの結晶形態を測定することにより晶出温度および母岩マグマを推定できる。

本研究では、鹿児島県薩摩半島北部に分布している四万十累帯北部を貫く紫尾山花崗岩体に着目し、花崗岩を形成したマグマの成因およびマグマの結晶化の温度条件を検証した。研究材料としては、花崗岩からジルコンを抽出し、Pupin[6]結晶形態分類法則に基づいて、マグマの温度および母岩の組成を明らかにした。結晶形態分類法則ではジルコンの錐面(Pyramid)及び柱面(Prism)の出現割合により、ジルコン結晶形態を表に表し、横軸に錐面の出現割合、縦軸に柱面の出現割合をそれぞれ8通りに分類し、計64通りの形態である(Fig. 1)。錐面出現割合は母岩の化学組成に依存し、柱面出現割合は結晶生成温度に依存するとされている。深成岩中では、主に錐面は{101}-{211}と{301}、柱面は0 prismと{100}-{110}が出現する(Fig.1 [7]より改変)。ジルコン晶出時のマグマ温度が高いほど{100}の出現割合が大きくなり、晶出時の母岩の化学組成がアルカリ性であるほど{101}

の出現割合が大きくなると考えられている。また、縦軸を Index of Temperature (以下 I.T), 横軸を Index of Alkalinity (以下 I.A) とし, 100 から 800 の指数を用いることで, ジルコンの結晶形態を数値的に取り扱うこと可能とした[6]。

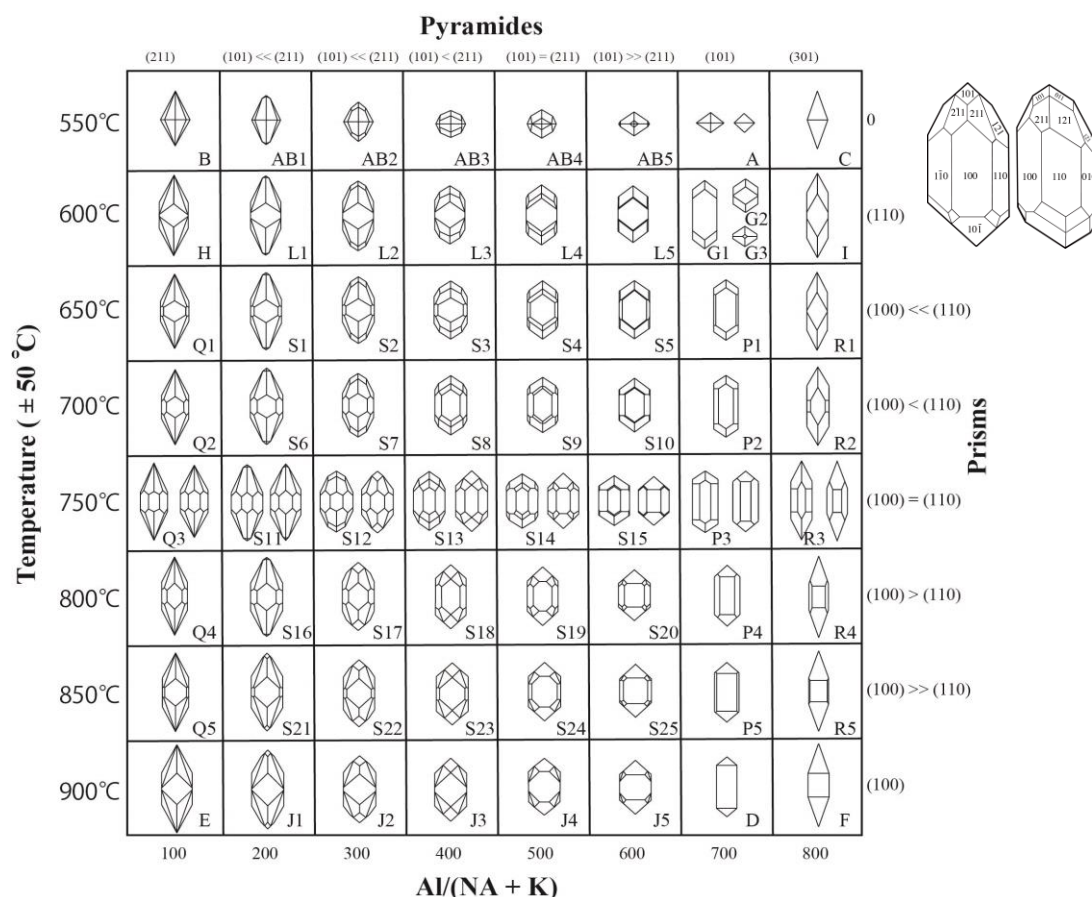


Fig. 1. Zircon crystal typological classification diagram (reproduced from Pupin [6]). Inset at top right shows typical crystal shape of types {100} and {110} zircons (modified after [7]).

2. 地質背景

紫尾山花崗閃緑岩体は, 九州外帯にみられる新第三期中新世の花崗岩体の一つである(Fig. 2a). 鹿児島県薩摩地方の北部に位置し, 南北約11km, 東西約4kmと南北に細長く分布している(Fig. 2b). この岩体は四万十累層北部の前期白亜紀から後期白亜紀にかけ形成された砂岩や頁岩, 砂岩泥岩互層を貫く形で分布している. そのため近くの四万十累層は接触変成作用により, ホルンフェルス化している. 先行研究文献により, 紫尾山花崗岩体の岩石記載的および地球化学的研究について数件の報告がある[1, 2, 3, 4, 5]. また, [5]の報告により, 紫尾山花崗閃緑岩体は岩石記載学的特徴から北部の平八重型と南部の楠八重型に分けられている(Fig. 2b). 平八重型岩石は, 普通角閃石含有黒雲母花崗閃緑岩—黒雲母花崗閃緑岩から構成されており, 楠八重型岩石は, 普通角閃石—黒雲母花崗閃緑岩—黒雲母花崗岩である. しかし, 互いの岩石の岩相変化は漸移的であり明瞭な境界は認められない. また, 貫入時期については黒雲母のK-Ar同位体比から12 Ma [1]とジルコンのフィッション・トラック年代は12.5 Ma [2]と報告さ

れている。しかし、母岩の晶出条件・温度およびマグマの成因は明確にされていない。そこで私達は、地質調査を行い、花崗岩に含まれるジルコンの結晶形態を調べることで、紫尾山花崗閃緑岩のマグマの成因について再検討した。

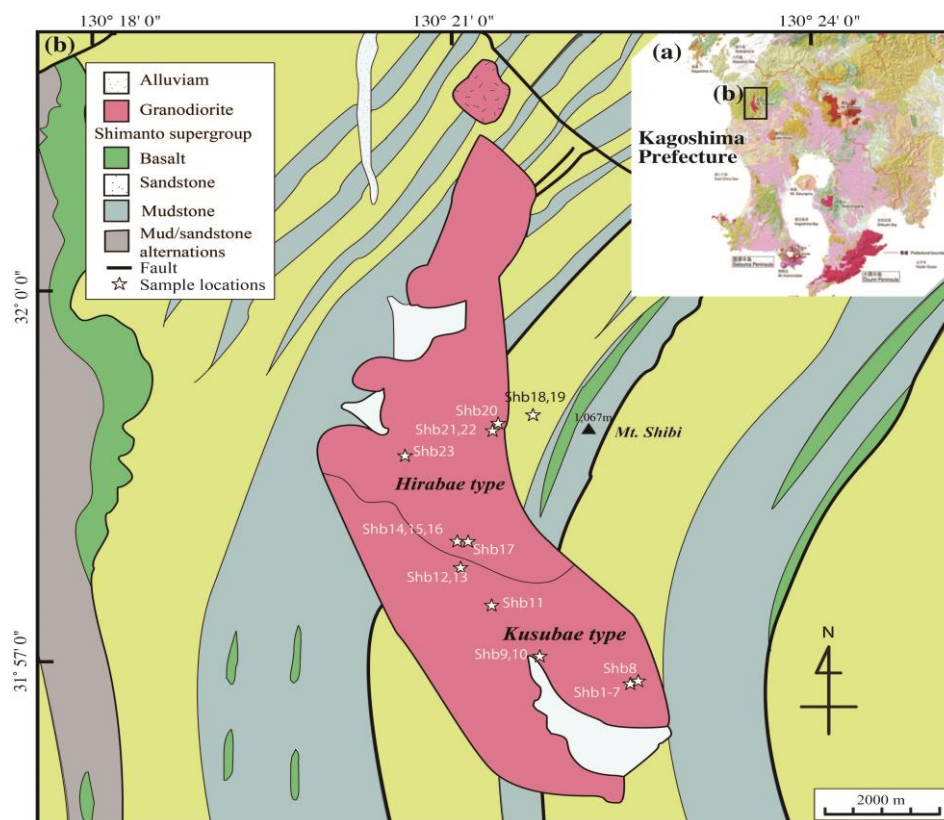


Fig. 2. (a) Geological sketch of the Kagoshima prefecture showing the exposures of Miocene granitoids of the Outer Zone of Kyushu (map adopted from the Kagoshima University Museum on-line field guide: https://www.museum.kagoshima-u.ac.jp/kaum/KFG_geology/kgeomap). (b) Simplified geological map of the Shibi-san granodiorite and surrounding rocks (map modified from [3, 4, 5] and the Geological Survey of Japan Seamless digital geological map of Japan (<https://gbank.gsj.jp/seamless/2d3d/>)).

3. 研究方法

紫尾山花崗閃緑岩体に通る国道 504 号線に沿った露頭のうち 12 地点で岩石を計 22 試料(内ホルンフェルス 1 試料)、真砂土を 1 試料採取した。また、岩石試料中 8 サンプルを約 1kg 程度選別し、Jaw Crusher を用いて 0.3 mm のサイズまで粉碎し、パンニングで重鉱物の分離を行い、計 629 ジルコン粒を抽出した。それぞれのジルコン粒の {100}, {110} 面が上に来るようにエポキシのマウントに固定し、ジルコンの内部構造が見えるまで研磨を行った。ジルコン内に含まれる包有物の同定をおこなうためレーザーラマン顕微鏡を用い、さらに、内部構造を電子顕微鏡を用いてカソードルミネッセンス (CL) および後方散乱電子 (BSE) 像を撮影した。最後に、それぞれのジルコン粒を顕微鏡下および CL・BSE 画像を観察し、Pupin[6]表と照らし合わせ、結晶形態の同定を行った。

4. 結果

4.1. 岩石記載

露頭スケールでは岩石が灰白色からやや白色の斑状で、粗粒度の斜長石、カリ長石、普通角閃石および黒雲からなる花崗岩である。一部の露頭では肉眼ではっきりとわかる自形カリ長石が確認できる (Fig. 3a)。特に岩体の中心部では直径3cmから5m程度の完全な形の自形結晶多く見られた (Fig. 3a, Fig. 4a-b)。南部ではこぶし大のゼノリスやオートリスも存在し、捕獲岩のうち、明らかに結晶の粒形が紫尾山花崗閃緑岩帯にあるものと異なる細粒結晶構造の花崗岩が分化の際初期にできたオートリスと考えられる (Fig. 4c)。花崗岩以外にも、花崗岩の貫入による接触変成作用で珪化が著しいホルンフェルスが境界部に見られた (Fig. 3b)。



Fig. 3. (a) Field photograph of porphyritic granodiorite. (b) Hornfels around granodiorite.

顕微鏡観察では、ほとんどの岩石試料が斜長石に富む角閃石黒雲母花崗岩から花崗閃緑岩である。紫尾山花崗閃緑岩の特徴として長石類の自形巨晶があり、双晶のカリ長石の自形巨晶も見られた (Fig. 5a-b)。花崗岩体の周辺にある四万十累層の砂・泥岩がホルンフェルス化しており、細粒の石英が熱変成作用の影響を受けている (Fig. 5c-d)。また、花崗岩に捕獲されたゼノリスは細粒の長石、石英およびガラス質の基質からなり、玄武岩組成のものではないかと考えられる (Fig. 5e-f)。

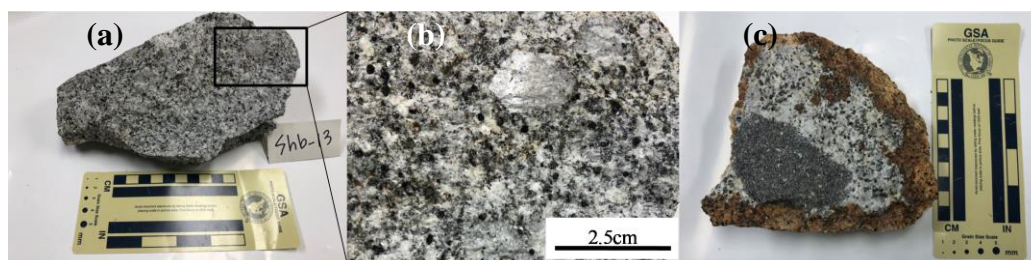


Fig. 4. (a) Hand specimen of Shibi-san granodiorite (sample Shb-13). (b) Zoomed part, shown in a rectangle, that contains a well-developed euhedral porphyritic feldspar crystal. (c) Hand specimen of granodiorite with mafic xenolith (sample Shb-09).

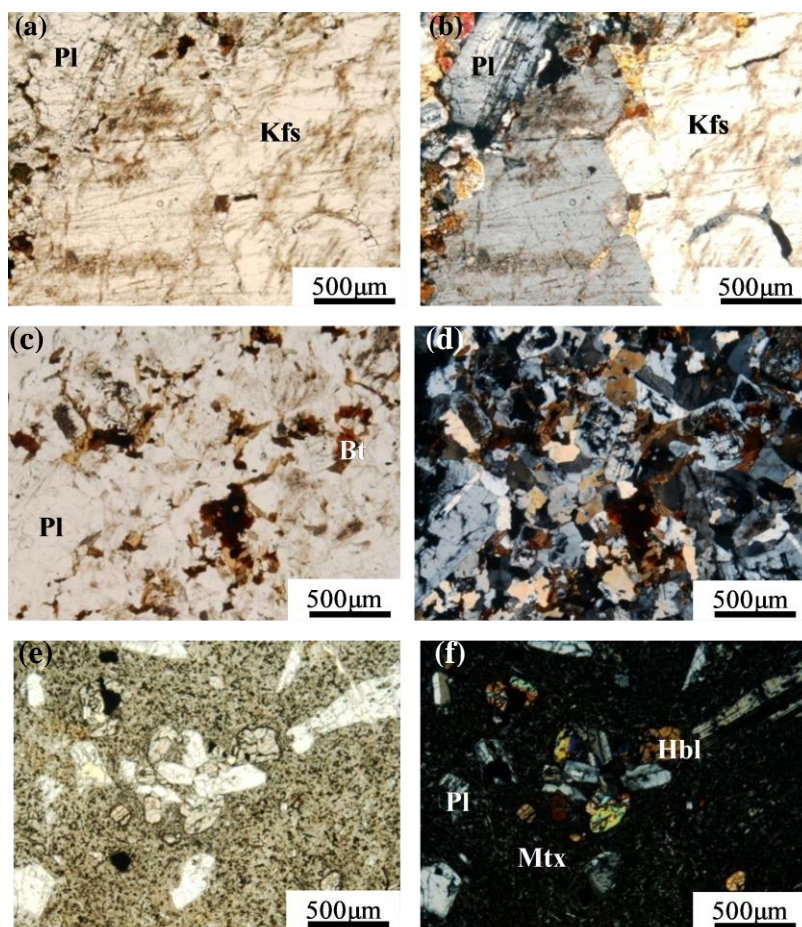


Fig. 5. Photomicrographs showing the textural features of Shibi-san granodiorite (a-b), hornfels (c-d), and xenolith part (e-f). Photographs in the left side are taken under plane-polarized light and those shown in the right side are under crossed polars. Abbreviations shown are: Bt: Biotite, Kfs: Potassium feldspar, Hbl: hornblende, Mtx: matrix (fine-grained fraction in the xenolith part), and Pl: plagioclase.

4.2. ジルコンの形態観察および分類

紫尾山花崗岩体から採集した 22 試料中 8 個から抽出した計 629 ジルコン粒の顕微鏡観察を行い、CCD カメラで画像化し (Fig. 6), 電子顕微鏡 (SEM) でも同様にそれぞれのジルコン粒の CL および BSE 像を撮影した (Fig. 7). その後、結晶形態の分析を [6] の分類法に基づいて行った. 偏光顕微鏡下でジルコンを観察した結果、殆どのジルコン粒が S19 から S24 を示しており、ジルコン形態の分布は $I. A = 500-700$, $I. T = 400-700$ でよく見られ、特に S15 タイプ、S20 タイプ、および P3 タイプがよく見られた (Fig. 8). 各岩石試料で検証したジルコン結晶形態の種類および温度範囲は Table 1 と Fig. 9 の通りである. また、分析したジルコンの結晶形態からほとんどの試料は [6] が提案した法によると花崗閃緑岩類に当て嵌まり、sub alkaline granite series のマグマ成分を示唆する (Fig. 10). 一方、ホルンフェルスから抽出したジルコンは細粒で、丸まっている形が多く含んでおり、明らかに碎屑期限性であり、変成作用の影響も受けていると解釈できる (Fig. 6, Fig. 7). レーザーラマン顕微鏡の分析結果からジルコン内に含まれる包有物のほとんどがアパタイトであり、一部はイルミナイトであった. また、CL

像でジルコンの内部構造でははっきりとしたオシラトリゾーニングが確認でき、一連のマグマから連続的に成長していることが確認できた。

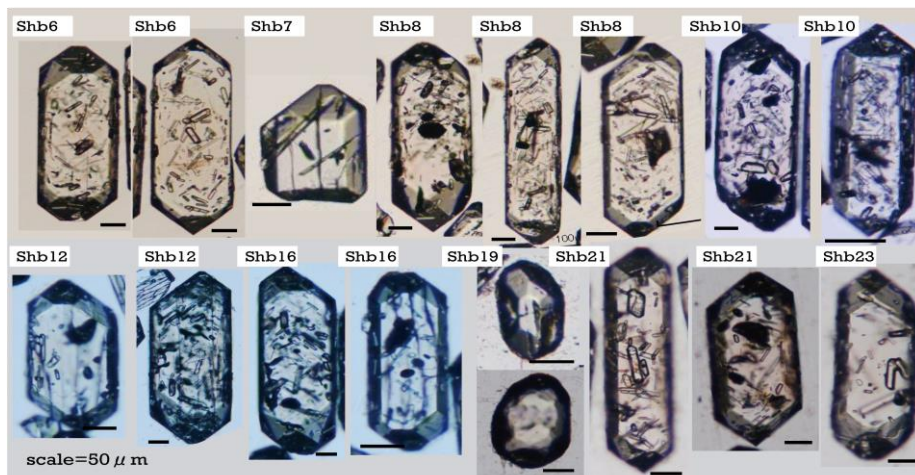


Fig. 6. Photomicrographs of zircon crystals. Note that majority of zircons display {100} and {110} type prism faces. Zircon from sample Shb-19 and Shb-21 are from the hornfels. Scale bar is 50 μm .

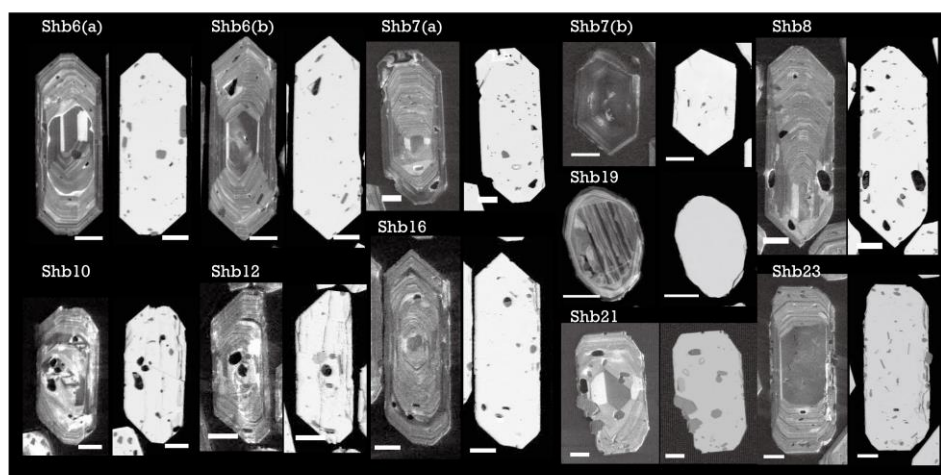


Fig. 7. Cathodoluminescence (CL) and backscattered electron (BSE) images of zircon from the Shibi-san granodiorite, showing the internal structures of zircons with typical oscillatory growth zoning. The enclosing hornfels (Shb-7b, Shb-19) rock shows zoning typically found in metamorphic rocks. Scale bar is 50 μm .

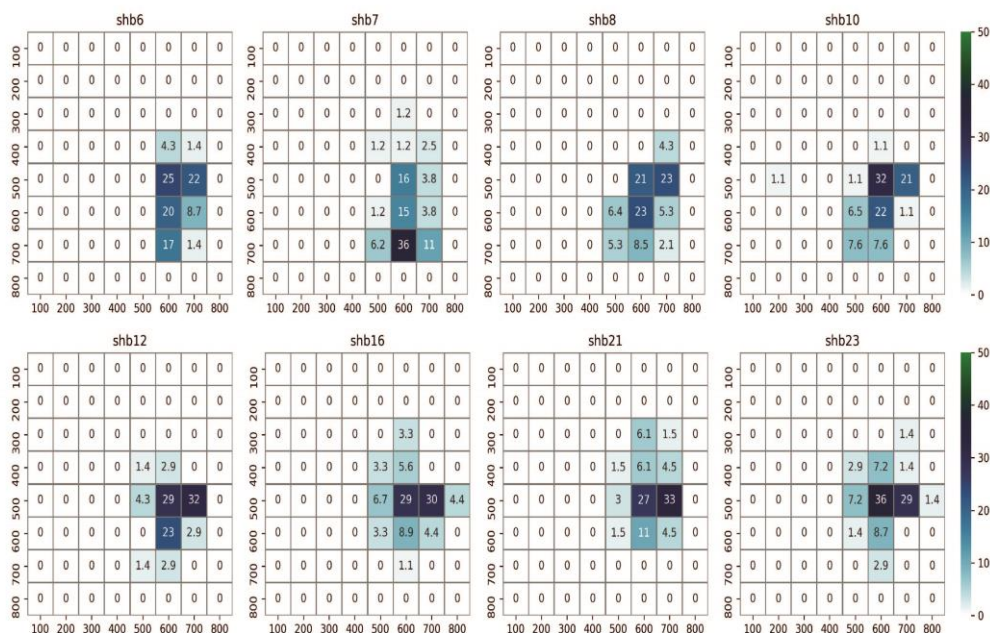


Fig. 8. Distribution of crystal shapes of zircon populations (%) from the Shibi-san granodiorite, plotted on the typological scheme of Pupin [6]. Darker colors (with higher percentage) represent the abundance of zircon crystal sub-types.

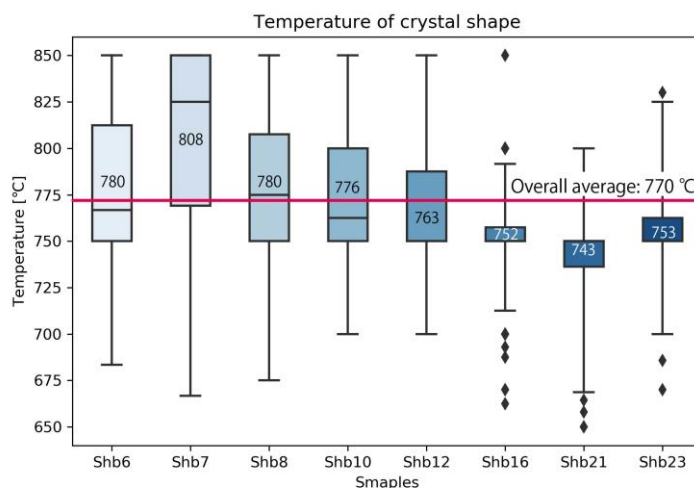


Fig. 9. Box whisker graph of temperature of crystal shapes. Numbers in the boxes represent average temperature of individual sample. Horizontal line in the middle of graph shows the overall average temperature (770 °C) calculated from all samples investigated in this study. Tops of the whiskers indicate the maximum and bottom are minimum temperature estimates. First interquartile range is 25%, center line is median representing 50% and the third interquartile range is 75%.

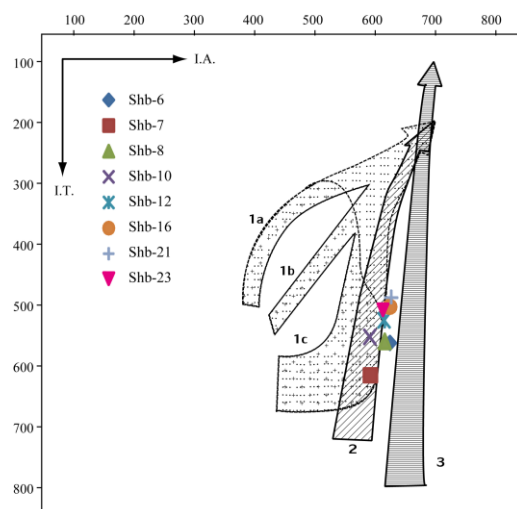


Fig. 10. The distribution of arrows shows the origin of magmatic segregation direction of zircon population (modified after [6]. (1a, b, c) calc-alkaline series granites, (2) sub-alkaline series granites, (3) alkaline series granites).

Table.1. Investigated zircon grains and estimated temperatures

Sample	Number of grains	Crystal shape category	Index of Alkalinity (I. A)	Index of Temperature (I. T)	T (°C) range	Average T (°C)
Shb-6	69	P ₂₋₅ , S ₁₀ , S ₁₅ , S ₂₀ , S ₂₅	632	561	683-850	780
Shb-7	80	P ₂₋₅ , S ₄₋₅ , S ₁₀ , S ₁₄₋₁₅ , S ₂₀ , S ₂₄₋₂₅	601	617	667-850	808
Shb-8	94	P ₂₋₅ , S ₁₀ , S ₁₅ , S ₁₉₋₂₀ , S ₂₄₋₂₅	623	560	675-850	780
Shb-10	92	P ₃₋₄ , S ₉₋₁₀ , S ₁₄₋₁₅ , S ₁₉₋₂₀ , S ₂₄₋₂₅	600	553	700-850	776
Shb-12	69	P ₃₋₄ , S ₉₋₁₀ , S ₁₅ , S ₂₄₋₂₅	624	525	700-850	763
Shb-16	90	P ₃₋₄ , R ₃ , S ₅ , S ₉₋₁₀ , S ₁₄₋₁₅ , S ₁₉₋₂₀ , S ₂₅	631	504	663-850	752
Shb-21	66	P ₂₋₅ , S ₄₋₅ , S ₁₀ , S ₁₄₋₁₅ , S ₂₀ , S ₂₂₋₂₅	635	486	650-800	743
Shb-23	69	P ₃₋₅ , S ₅ , S ₉₋₁₀ , S ₁₄₋₁₅ , S ₁₉₋₂₀	620	506	670-830	753
Average T (all)						769

6. まとめ

本研究では紫尾山花崗戦力岩体は一つの岩体であり，平八重型と楠八重型の2種類に分けにくい。露頭スケールでも境界および岩石記載学的にも区別出来ない。局地的に変成作用及び浸食風化の影響

はみられたが、先行研究ではおそらく化学組成を基準に岩体を二つに分けており、詳細に検討すると単一の岩体と解釈できる。

また、岩体を南側を全体的にカバーした岩石試料から抽出したジルコンの結晶形態の結果から全ての試料に同じ結晶形態のジルコンが存在し、マグマの組成同一であると考えられる。ジルコンの結晶形態から見積もった温度 (Table 1) は最大で 850°C, 最小で 650°C であった。全体の温度平均は 770°C であり、各平均との差も有意にみられなかった。また、ジルコンの形態観察によって花崗岩の中にジルコンの晶出温度が 650-850 °C の間に集中しており、非常に短い時間で花崗岩体が形成されたとする[2]の報告を補強する成果が得られた。

最後に、Pupin[6]の結晶形態の I.T と I.A の平均と母岩マグマの分化方向に関するグラフでは、(2) の sub-alkaline series granites と(1a)の calc-alkaline series granites に分布する (Fig. 10)。したがって、この結晶形態より母岩マグマは sub-alkaline series granites に近い組成であったと解釈できる。CL 像はジルコンの内部構造は火成由来を示唆し、ホルンフェルスに含まれていた変成作用を受けた堆積岩由来のジルコンと大いに異なる。このことから、[6]で提案したジルコンの結晶形態方法は花崗岩類に有効なツールであり、マグマの晶出温度および成因を明らかにするには応用出来る。ジルコンの内部構造は連続の成長歴を示しており、結晶形態および内部構造の両方のツールが火成岩の起原および結晶過程を理解する簡単なやり方である。

謝辞

本研究フィールドワーク及び有益な討論をくださった大木先生（鹿児島大学名誉教授）にはここで謝辞を申し上げます。また、一部のジルコン粒の CL 像は安東純一先生（広島大学教授）の協力を得てから取得したため、ここで謝辞を申し上げます。山本啓司先生（鹿児島大学教授）に研究の過程で様々なアドバイスをいただき、ここで謝辞を申し上げます。

参考文献

- [1] 河野義礼, 植田良夫, 岩石鉱物鉱床学会誌56巻第5号 (1966), 191-211.
- [2] M. Miyachi, Jour. Min. Pet. Sci. 80-9 (1985), 406-409.
- [3] 米田茂夫, 岩松暉, 地質学雑誌第96巻第2号 (1987a), 117-123.
- [4] 米田茂夫, 岩松暉, 地質学雑誌 93 巻, 12 号 (1987b), 881-895.
- [5] 山本温彦, 大庭昇, 富田克利, 鹿児島大学理学部紀要 21 (1988), 35-49.
- [6] J.P. Pupin, Cont. Min. Pet. 73 (1980), 207-220.
- [7] 林正雄, 地質学雑誌第96巻第2号 (1990), 117-123.