朝倉地域に産する周防変成岩類の接触変成作用の温度圧力条件－上昇過程の制約－

Pressure and temperature conditions of contact metamorphism of the Suo metamorphic rocks in Asakura area, Fukuoka Prefecture, Japan: constraints on uplifting process

Abstract

北野一平^{*†} 池田 剛^{**}

Ippei Kitano^{†} and Takeshi Ikeda^{**}*

2012年2月24日受付.

2012年8月21日受理.

^{*} 九州大学理学部地球惑星科学科
Department of Earth and Planetary Sciences,
Faculty of Science, Kyushu University, 33
Hakozaki, Fukuoka 812-8581, Japan

[†] 現所属：九州大学大学院比較社会文化学府日本
社会文化専攻地域資料情報講座

present address: Division of Regional Mate-
rial Information, Graduate School of Social
and Cultural Studies, Kyushu University, 744
Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395,
Japan

^{**} 九州大学大学院理学府地球惑星科学部門
Department of Earth and Planetary Sciences,
Graduate School of Science, Kyushu Univer-
sity, 33 Hakozaki, Fukuoka 812-8581, Japan

Corresponding author; I. Kitano,
2CS12010E@s.kyushu-u.ac.jp

The Suo metamorphic rocks of the Asakura area of Fukuoka Prefecture underwent contact metamorphism during the intrusion of granitic magmas in the Cretaceous, forming a contact aureole. This aureole is divided from south to north with ascending metamorphic grade into chlorite, chlorite–biotite, biotite, and andalusite zones, based on pelitic mineral assemblages. The andalusite isograd is defined by a muscovite + quartz = andalusite + K-feldspar + water reaction, based on the coexistence of andalusite and K-feldspar. Garnet–biotite thermometry and garnet–biotite–plagioclase–quartz barometry indicate that the andalusite zone formed at temperatures of $560 \pm 50^\circ\text{C}$ and at pressures of 2.3 ± 0.90 kbar. The Suo metamorphic rocks were exhumed to ca. 9 km depth by around 95 Ma, assuming that heat was supplied from the Asakura granodiorite to the north, and reached the surface and were overlain by sediments of the Nogata Group sometime before 44 Ma.

Keywords: Suo metamorphic rocks, contact metamorphism, pressure and temperature condition, Asakura area

はじめに

三郡変成帯はNishimura(1998)により、変成年代や変成条件で蓮華帯と周防帯に分けられている。蓮華帯は330～280 Maに青色片岩相から緑簾石–角閃岩相の変成作用を受けた変成帯であり、飛騨外縁帯から山陰地方を経て北部九州まで広がっている。周防帯は230～160 Maにプレーナイト–青色片岩相、まれに緑簾石–角閃岩相の変成作用を受けた変成帯であり、近畿地方西部から中国地方を経て北部および中部九州、長崎、西表島および石垣島まで広がっている(Nishimura, 1998)。蓮華帯と周防帯の一部は、主に白亜紀花崗岩類の貫入による接触変成作用を受けている(井上, 1957; 村上・藤本, 1957; 山田, 1972; 佐脇, 1985; Fukuyama et al., 2004; 富田ほか, 2008)。そのうち、周防帯の泥質の接触変成岩中では、低圧で安定な紅柱石や堇青石などの産出が報告され(村上・藤本, 1957; 佐脇, 1985; 富田ほか, 2008)、周防帯は地下浅所で花崗岩類に貫入されたことがわかる。この深さは接触変成作用の温度圧力条件から求めることができる。

本研究では冷却年代が既知の花崗岩類による接触変成作用

を受けた、福岡県朝倉地域に産する周防変成岩類(Nishimura, 1998)の変成分帯を行った。そして、接触変成作用の温度圧力条件を見積もった。白亜紀に接触変成作用を被った北部九州の周防帯の変成条件の研究と比較することにより、接触変成作用時の周防変成岩類の深さ分布を考察した。

地質概説

研究地域には東西に約20 km、南北に約15 kmにわたり周防変成岩類が分布している。その北部と南東部は白亜紀花崗岩類に貫入されている。東部は古第三系直方層群と新第三系北坂本累層に覆われ、西部から南部にかけては第四系に覆われている(井上, 1957; 松本, 1958) (Fig. 1)。

研究地域は全体としてドーム構造を形成している(井上, 1957)。ドームの北翼部は小褶曲がなく、北上するにつれて北向きに急傾斜($40^\circ \sim 70^\circ$)となっている。ドームの南翼部は小褶曲を繰り返しており、傾斜は北翼部に比べて緩やか(30° 以下)である。線構造は一般的にENE–WSW方向である(井上, 1957)。断層にはE–W系とNE–SW系があり、前者は後者より先に形成されたと考えられている(井上, 1957)。

Fig. 1. Maps showing the location and geology of the Asakura area; after Inoue (1957) and Kubo et al. (1993).

Fig. 2. Distribution of pelitic mineral assemblages, metamorphic zones, and the location of the sample analyzed in detail during this study (K109); all assemblages contain quartz (Qtz) and plagioclase (Pl), both of which are omitted in the legend. Abbreviations: Chl, chlorite; Ms, muscovite; Bt, biotite; Grt, garnet; Crd, cordierite; Kfs, K-feldspar; And, andalusite; and Crn, corundum.

変成岩類は主に泥質岩からなり、その他に砂質岩、苦鉄質岩、珪質岩および結晶質石灰岩が産する(井上, 1957; 松本, 1958)。泥質岩は砂質岩、苦鉄質岩および結晶質石灰岩を挟む。その中で厚さ 200~300 m の層をなす砂質岩には薄層の苦鉄質岩が産し、比較的厚い層(約 60 m)をなす苦鉄質岩には厚さ 1 m 以下の薄層の珪質岩が産する(井上, 1957)。井上(1957)はこの地域の変成分帯を行い、泥質岩や砂質岩中に黒雲母が出現し、同時に苦鉄質岩中にアクチノ閃石が出現するアイソグラッド、および苦鉄質岩中に透輝石が出現するアイソグラッドにより 3 帯に分けた。

本地域に産する花崗岩類は貫入関係より、古い順に杷木花崗閃緑岩、朝倉花崗閃緑岩および真崎花崗岩に分類される(唐木田ほか, 1962; 唐木田ほか, 1992)。このうち、南東部に貫入している杷木花崗閃緑岩の Rb-Sr 全岩アイソクロン

年代は 118 ± 11.3 Ma であり(小山内ほか, 1993)、北部に貫入している朝倉花崗閃緑岩の黒雲母の K-Ar 年代は 95.2 ± 4.8 Ma である(村上, 1989)。松本(1958)によれば、杷木花崗閃緑岩と朝倉花崗閃緑岩は変成岩類に対してそれぞれ subconcordant と concordant な貫入をしている。

東部に産する直方層群は石炭と凝灰質岩を頻りに挟む泥岩、砂岩および礫岩からなる。最上部層のデイサイト質凝灰岩中のジルコンのフィッシュトラック年代として 44.2 ± 3.4 Ma が得られている(尾崎・濱崎, 1991)。直方層群を覆っている北坂本累層は基底角礫岩と安山岩〜デイサイト質溶岩、凝灰角礫岩および火山円礫岩からなる。ジルコンのフィッシュトラック年代は凝灰角礫岩から 5.66 ± 0.30 Ma が、安山岩質溶岩から 4.83 ± 0.51 Ma が得られている(渡辺ほか, 1986)。

zone	Chl zone	Chl-Bt zone	Bt zone	And zone
Chl				
Ms				
Bt				
Grt				
And				
Crd				
Kfs				
Pl				
Qtz				

Fig. 3. Stability range of the constituent minerals within pelitic rocks in each zone; dotted lines indicate minor or rare minerals.

変成分帯

調査地域の広範囲に分布する泥質岩を用いて変成分帯を行った。南から北へ順次、黒雲母が出現する黒雲母アイソグラッド、緑泥石が消滅する緑泥石消滅アイソグラッド、紅柱石が出現する紅柱石アイソグラッドを定義した。この3つのアイソグラッドによって、調査地域は南から緑泥石帯、緑泥石-黒雲母帯、黒雲母帯および紅柱石帯に分けられる。変成分帯と各鉱物組み合わせの分布を Fig. 2 に示す。各帯における泥質岩中の鉱物が安定な範囲と、各岩型の鉱物組み合わせをそれぞれ Fig. 3, Table 1 に示す。電気石、ジルコン、方解石、スフェーン、緑簾石、燐灰石、炭質物、イルメナイト、黄鉄鉱は副成分鉱物として泥質岩中に含まれる。

1. 緑泥石帯

緑泥石帯は、泥質岩中に黒雲母が含まれないことで定義される。主に緑泥石や白雲母からなる優黒質部と、主に石英や斜長石からなる優白質部が縞状構造をなす。緑泥石と白雲母（どちらも長軸長は最大約 0.3 mm）は、定向配列して片理を

形成している (Fig. 4a)。白雲母と緑泥石からなる薄層が微褶曲していることもある。ザクロ石は優黒質部に時折産し、自形～半自形で、最大粒径が約 0.2 mm になる。通常、包有物を含まないが、一部炭質物を包有することがある。石英はしばしば波動消光や縫合組織を示す。緑泥石はしばしば酸化緑泥石になっている。泥質岩の代表的な鉱物組み合わせは、緑泥石 + 白雲母である。以下、共通して含まれる斜長石と石英は省略する。

2. 緑泥石-黒雲母帯

緑泥石-黒雲母帯は、泥質岩中に黒雲母と緑泥石が共存することで定義される。黒雲母 (最大約 0.3 mm) は主に優黒質部に産し、半自形～他形で緑泥石や白雲母とともに定向配列して片理を形成している (Fig. 4b)。この帯の緑泥石と白雲母の最大の長軸長は、それぞれ約 0.5 mm, 約 0.3 mm である。黒雲母の一部はしばしば緑泥石に置き換えられている。この帯の高変成度域では、低変成度域に比べて緑泥石の量が少なく、黒雲母の量が多い。泥質岩の代表的な鉱物組み合わせは、緑泥石 + 白雲母 + 黒雲母と黒雲母 + 白雲母である。

3. 黒雲母帯

黒雲母帯は、泥質岩中に緑泥石を欠くことで定義される。黒雲母と白雲母は定向配列している (Fig. 4c)。この帯の黒雲母 (最大約 0.4 mm) と白雲母 (最大約 0.7 mm) は、緑泥石-黒雲母帯のそれらより粗粒である。まれに、半自形～他形のカリ長石 (最大約 0.5 mm) が優白質部のみに産している。石英の縫合組織は弱くなっている。後退変成作用の産物とみられる、細粒の白雲母が時折みられる。泥質岩の代表的な鉱物組み合わせは、黒雲母 + 白雲母である。

4. 紅柱石帯

紅柱石帯は泥質岩中に広く紅柱石が産することで定義される。紅柱石は最大約 2 mm の半自形～他形の斑状変晶として産する (Fig. 4d)。黒雲母や白雲母、石英、不透明鉱物などを包有している。また、紅柱石帯には半自形～他形の堇青

Table 1. Pelitic, psammitic, mafic, and calc-silicate mineral assemblages within each metamorphic zone; abbreviations are as for Fig. 2 with the addition of Ep, epidote; Cam, calcic amphibole; Zo, zoisite; Cpx, clinopyroxene; Cal, calcite; and Spn, sphene.

	Chl zone	Chl-Bt zone	Bt zone	And zone
Pelitic rock	Chl + Ms ± Grt + Pl + Qtz	Chl + Ms + Bt ± Grt + Pl + Qtz Bt + Ms + Pl + Qtz Chl + Ms + Pl + Qtz	Bt + Ms ± Kfs + Pl + Qtz	Bt + Kfs ± Grt + Pl + Qtz Bt + Kfs + And + Pl + Qtz Bt + And + Crd + Pl + Qtz Bt + Kfs + And + Crd ± Grt + Pl + Qtz Bt + Crd + Pl + Qtz Bt + Kfs + Crd ± Grt + Pl + Qtz
Psammitic rock	Chl + Ms + Kfs ± Pl + Qtz	Bt + Ms + Kfs ± Pl + Qtz	Bt + Ms ± Grt + Pl + Qtz	
Mafic rock	Chl + Ep ± Ms ± Cam + Pl + Qtz	Ep + Cam ± Chl + Pl + Qtz		Cpx + Cam + Bt ± Zo + Pl ± Qtz
Calc-silicate rock	Chl + Ms + Ep ± Cal ± Spn + Pl + Qtz	Bt + Chl + Ms + Ep ± Cal ± Spn + Pl + Qtz	Bt + Ep + Cam ± Ms ± Cal ± Spn + Pl + Qtz

Fig. 4. Photomicrographs of representative pelitic rocks in each zone under plane polarized light, barring (g), which was taken under cross-polarized light. (a) Muscovite and chlorite have preferred orientations and define the schistosity in the chlorite zone. (b) Biotite often occurs parallel to the schistosity in the chlorite–biotite zone. (c) Biotite and muscovite have preferred orientations in the biotite zone. (d) Subhedral or anhedral porphyroblasts of andalusite are present in melanocratic sections of the andalusite zone; these porphyroblasts are often in contact with cordierite and biotite. (e) Andalusite locally rimmed by cordierite aggregates. (f) Garnet in the andalusite zone is euhedral to subhedral. (g) Corundum in the andalusite zone rimmed by muscovite aggregates.

Fig. 5. Zoning profile of a garnet along line AB in Fig. 4f, showing variations in almandine (X_{alm} : Total Fe / (Total Fe + Mg + Mn + Ca)), spessartine (X_{sps} : Mn / (Total Fe + Mg + Mn + Ca)), pyrope (X_{pyr} : Mg / (Total Fe + Mg + Mn + Ca)), grossular (X_{grs} : Ca / (Total Fe + Mg + Mn + Ca)), and X_{Mg} (= Mg / (Total Fe + Mg)) contents. Numbers represent mole fractions of the four end-member components and X_{Mg} .

Fig. 6. Graph showing variations in X_{alm} vs. X_{sps} compositions shown in Fig. 5 and in the rims of several grains in contact with biotite or quartz; analyses labeled A and B indicate the rim composition at A and B in Fig. 5, respectively.

石がしばしば産し、斑状変晶(最大約 1.7 mm)をなすことがある。紅柱石を囲む堇青石の多結晶体がみつめられる(Fig. 4e)。黒雲母は長軸長最大約 0.7 mm で、あまり定向配列していない。カリ長石は最大粒径約 0.8 mm であり、細粒の白雲母や石英を包有している。石英には波動消光や縫合組織がほとんど見られない。ザクロ石は優黒質部と優白質部の両方に産し、優黒質部で自形～半自形に、優白質部で他形になっている。粒径は最大約 0.8 mm であり(Fig. 4f)、緑泥石や石英、イルメナイトなどを包有する。堇青石はしばしばピナイト化したり、細粒の白雲母や黒雲母の集合体に一部あるいは完全に置き換えられたりしている。

紅柱石帯の泥質岩にはまれにコランダムが産する。Fig. 2 に示すように、コランダムはカリ長石を含む泥質岩に限られ、そのコランダムは白雲母の多結晶体に囲まれている(Fig. 4g)。

泥質岩の代表的な鉱物組み合わせは、黒雲母 + カリ長石

+ 紅柱石、黒雲母 + カリ長石 + 紅柱石 + 堇青石および黒雲母 + カリ長石 + 堇青石である。

鉱物の化学組成

紅柱石帯の 1 試料(No. K109)中の構成鉱物の化学組成を測定した。産地は Fig. 2 に示す。鉱物組み合わせは、黒雲母 + カリ長石 + 紅柱石 + 堇青石 + ザクロ石で、副成分鉱物として電気石、燐灰石、炭質物、イルメナイト、黄鉄鉱が含まれる。主に黒雲母、ザクロ石、紅柱石、堇青石からなる優黒質部と、主に石英、斜長石、カリ長石からなる優白質部からなる。堇青石はピナイト化している。この試料を九州大学のエネルギー分散型 EPMA(走査型電子顕微鏡 JEOL5800LV に Oxford Link ISIS を装着)を用いて、照射電流 0.5 nA、加速電圧 20 kV、ビーム径 4 μm という条件で測定した。測定時間 100 秒で、ZAF 補正を行った。Na はヒスイ輝石、Mg, Al, Si は酸化物、K は臭化カリウム、Ca はフッ化カルシウム、Ti, Mn, Fe は金属を各元素の標準試料として用いた。

1. ザクロ石

ザクロ石は縁辺部に向かってスペッサルティン成分とグロッシュラー成分が減少し、アルマンディン成分とパイローブ成分が増加する累帯構造を示す(Figs. 5, 7)。 X_{Mg} (= Mg / (Total Fe + Mg)) はパイローブ成分と同様に、縁辺部に向かって増加する(Fig. 5)。しかし、縁部の組成は同一でない(Fig. 5)。この累帯構造の組成変化は一本のトレンドを形成し(Fig. 6)、同一試料の他の縁部の組成もこのトレンド上にある。アルマンディン成分とスペッサルティン成分は縁部でも場所ごとに異なる。このうち、黒雲母に富む部分と接する縁部は粒子によらずほぼ一定の組成を示し、そのトレンド上でスペッサルティン成分の最小値をとる。石英に富む部分と接する縁部の組成はこのトレンド上でばらつく(Fig. 6)。

2. 黒雲母

優黒質部の黒雲母は優白質部のものよりも Ti に富み、低い X_{Mg} をもつ傾向がある(Fig. 8)。優黒質部の黒雲母でも、堇青石の分解によって生成されたと考えられる黒雲母は Ti に乏しく、高い X_{Mg} をもつ(Fig. 8)。

Fig. 7. Backscattered electron images (BEI) and X-ray image maps showing variations in Fe, Mn, Mg and Ca concentrations in the garnet shown in Fig. 4f.

3. 斜長石

斜長石は縁辺部に向かってアノーサイト含有量(= $\text{Ca} / (\text{Ca} + \text{Na} + \text{K})$)が減少する累帯構造を示し、核部の最大のアノーサイト含有量は優黒質部で0.25、優白質部で0.21である。優黒質部で、縁部のアノーサイト含有量が0.04の斜長石が局所的に産する。

議 論

1. 変成反応

泥質岩を用いた本研究の変成分帯は、泥質岩、砂質岩および苦鉄質岩を用いた井上(1957)の変成分帯と次の点で異なる。井上(1957)の苦鉄質岩を用いたアイソグラッドは、本研究では定義されなかった。しかし、透輝石が出現する地域は紅柱石帯に限られている(Table 1)。井上(1957)は透輝石の分布する地域を最高変成度域と定義しており、その分布は本研究での紅柱石帯とほぼ一致する。本研究では、井上(1957)に記載されていなかった紅柱石が広範囲に産することを確認したので、紅柱石帯を定義した。最後に、井上

(1957)の黒雲母アイソグラッドより低変成度側で黒雲母を確認したので、黒雲母アイソグラッドはやや南西に再配置された。

緑泥石帯の砂質岩の主な鉱物組み合わせは、緑泥石 + 白雲母 + カリ長石で、緑泥石-黒雲母帯の砂質岩のそれは、黒雲母 + 白雲母 + カリ長石である。両者の間に

のAKF不連続反応が考えられる。これはWang et al. (1986)が領家帯で、砂質岩の黒雲母アイソグラッド反応として定義した反応である。本研究では砂質岩の産出が少ないこと、砂質岩中の黒雲母がWang et al. (1986)の記載のようなカリ長石を囲む組織が見られないことより、泥質岩の黒雲母アイソグラッド反応と反応(1)の前後関係を野外で確認することはできなかった。しかし、泥質岩中で黒雲母は白雲母、緑泥石と共存することより、反応(1)は緑泥石帯中で生じていたと考えられる。

紅柱石アイソグラッド上の試料は、黒雲母、カリ長石、お

Fig. 8. Ti content (atoms per formula unit) based on 11 oxygens and X_{Mg} of biotite

よび紅柱石を含む。石英過剰の岩石中で紅柱石とカリ長石が共存することは、白雲母が不安定であることを示唆する。黒雲母帯では白雲母は石英と共存しているので、次のような紅柱石アイソグラッド反応が考えられる。

しかし、前述のように、紅柱石帯の泥質岩中には白雲母が産する。それらのうち、紅柱石やカリ長石の包有物として産する白雲母は、累進変成作用時に紅柱石やカリ長石が形成される前に存在していたと考えられる。また、堇青石を置換する細粒の白雲母集合体は、後退変成作用時に堇青石の分解によって生成したと考えられる。したがって、最高変成作用時に、石英過剰なマトリクスに安定に存在していたと考えられる白雲母は確認されていない。このことは反応(2)をアイソグラッド反応と考えることと矛盾しない。紅柱石帯にみられる、黒雲母 + カリ長石 + 紅柱石 + 堇青石の組み合わせは、反応(2)より高温で生じる次の連続反応で説明できる。

この反応は温度が上がると右辺側に進行し、紅柱石は反応物となる(Pattison, 1989)。このことは、多くの紅柱石が他形であることや紅柱石が堇青石の多結晶体に囲まれる組織(Fig. 4e)と調和的である。堇青石は紅柱石帯のみに産するので、堇青石 + カリ長石の共生関係はこの反応によって生じたと考えられる。

前述したように、紅柱石帯中のカリ長石を含む泥質岩に、白雲母の集合体に囲まれたコランダムがまれに産する。この産状はコランダムがカリ長石と反応する次の後退変成反応によって形成されたと考えられる。

反応(4)は反応(2)より高温で生じる。反応(4)は石英に不飽和な条件で生じるにも関わらず泥質岩にみられることは、局部的に石英に不飽和な環境が実現していた可能性を示唆する(例えば、佐脇, 1985)。

以上のように、紅柱石帯に見られる鉱物組み合わせが連続

反応(3)に相当し、紅柱石帯中の反応組織が累進変成反応(反応(3))と後退変成反応(反応(4))と解釈された。これら反応(3)、(4)はいずれも反応(2)よりも高温で生じる反応であり、反応(2)を紅柱石帯のアイソグラッド反応と考えることと調和的である。

2. 温度圧力条件の見積もり

ザクロ石の縁部の組成が、累帯構造が定義する組成トレンド上で変動することから、各縁部が累帯構造生成における異なる時期の組成を保持していることがわかる。黒雲母に富む部分と接する縁部の化学組成はほぼ同じで、かつ X_{Sps} が最小であることから(Fig. 6)、それらは最高変成時まで成長して平衡に至ったと考えられる。一方、石英に富む部分と接する縁部は途中で成長が止まり、その時の組成を保持したと考えられる。したがって、黒雲母に富む部分と接している縁部が最高変成時の組成を表すと考え、地質温度圧力計に用いた。前述のように、ザクロ石は優黒質部に産することから、優黒質部の黒雲母および斜長石の組成を用いた。優黒質部の黒雲母の組成変動の一部は後退変成作用時の堇青石の分解に起因し、Tiに乏しくなる傾向がある。したがって、この後退変成作用の影響を受けていない黒雲母の組成として、最もTiに富む黒雲母の組成を選んだ。斜長石は核部の組成を用いた。最高変成時に平衡と考えられる組成をTable 2に示す。ザクロ石の X_{Sps} は0.29で、既存の地質温度計作成に用いた値よりも高い。中村(1996)は $X_{Sps} = 0.35 \sim 0.40$ でも Hodges and Spear(1982)の温度計が有効であることを示している。したがって、これらの組成を Hodges and Spear(1982)のザクロ石-黒雲母地質温度計と Hoisch(1990)のザクロ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計に適用させて、紅柱石帯の温度圧力条件を見積もった。

Hoisch(1990)の鉄端成分の式も、マグネシウム端成分の式も等しく 560°C , 2.3 kbar を示す。温度計の誤差から発生する圧力の誤差は 0.90 kbar である。したがって、 $560 \pm 50^\circ\text{C}$, $2.3 \pm 0.90 \text{ kbar}$ という温度圧力条件を得た。この温度圧力条件は紅柱石安定領域で、 H_2O の活動度を1とした場合には白雲母 + 石英の安定領域内である(Fig. 9)。変成条件が、白雲母 + 石英の安定領域内にあることは、紅柱石アイソグラッド反応の議論と矛盾する。1つの可能性として、泥質岩中に炭質物が含まれることから変成流体の組成が純粋な H_2O でなかったことが挙げられる。例えば $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4$ の場合(Holdaway and Lee, 1977)、見積られた温度圧力条件は、白雲母 + 石英の不安定領域内に入り、結論との矛盾は解消される(Fig. 9)。また、反応(2)にアルバイトを加えた反応(白雲母 + アルバイト + 石英 = アルミナ珪酸塩 + カリ長石 + H_2O)は、 $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.6$ の時にこの温度圧力条件で生じる(Johannes and Holtz, 1996)。

3. 上昇過程

推定した変成反応(1)、(2)、(3)はこの順に生じる温度が高くなる。したがって、変成温度は北に向かって上昇しており、この傾向は井上(1957)の結論を支持する。このことは、北部と南東部に貫入している花崗岩体のうち、北部に貫入した朝倉花崗閃緑岩が調査地域の温度構造を支配する熱源であ

Table 2. Garnet (rim in contact with biotite), plagioclase (core), and biotite (matrix) compositions within sample K109; garnet, plagioclase, and biotite formulae are calculated using 12, 8, and 11 oxygens, respectively. - : not detected.

Mineral	Grt	Pl	Bt
SiO ₂	36.38	60.72	33.54
TiO ₂	-	-	2.96
Al ₂ O ₃	20.34	24.20	19.16
FeO	27.93	-	22.36
MnO	12.64	-	0.79
MgO	1.31	-	6.30
CaO	1.14	5.51	-
Na ₂ O	-	8.76	-
K ₂ O	-	0.10	8.59
Total	99.74	99.29	93.70
Si	2.99	2.72	2.64
Ti			0.18
Al	1.97	1.28	1.78
Fe	1.92		1.47
Mn	0.88		0.05
Mg	0.16		0.74
Ca	0.10	0.26	
Na		0.76	
K		0.01	0.86
Total	8.02	5.03	7.72

Fig. 9. Pressure–temperature diagram indicating the metamorphic conditions recorded by sample K109; phase diagram for Al₂SiO₅ polymorphs is after Bohlen et al. (1991), reactions (2) and (4) at $X_{\text{H}_2\text{O}} = 1.0$ are after Pattison (1989), and reaction (2) at $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4$, shown as a broken line, is after Holdaway and Lee (1977). Abbreviations are as for Fig. 2, with the addition of Ky, kyanite; and Sil, sillimanite.

ることを示唆する。

今回得られた変成圧力は、地殻の密度を 2700 kg/m³ と仮定すると、深さ約 9 km に相当する。つまり、230～160 Ma に高压の変成作用を受けた周防変成岩類は、本地域では少なくとも 95 Ma (村上, 1989) までに地下約 9 km まで上昇したと考えられる。さらに、直方層群に覆われることから、遅くとも 44 Ma (尾崎・濱崎, 1991) には地表に達していたこともわかった。

北部九州の周防変成岩類は、ほぼ同時期の白亜紀花崗岩類による接触変成作用を被っている。本研究の北東には平尾花崗閃緑岩 (黒雲母 K-Ar 年代 91.7 ± 4.6 Ma, 村上, 1989), 南西には玉名花崗閃緑岩 (黒雲母 K-Ar 年代 99.7 ± 2.5 Ma, 富田ほか, 2008) が貫入し、その接触変成条件はそれぞれ約 700 °C, 3 kbar 以下 (Fukuyama et al., 2004), 700 °C 前後, 4～6 kbar (富田ほか, 2008) と見積もられている。本研究の成果と合わせると、周防変成岩類は約 95 Ma までに南西部より北東部の方が、より浅所に達していたことが示唆される。

ま と め

調査地域の周防変成岩類は泥質岩を用いて変成分帯され、北へ向かって変成度が上昇することがわかった。そのうちの最高変成度地域の変成条件は 560 ± 50 °C, 2.3 ± 0.90 kbar と見積もられた。この条件は水の分圧が低い変成流体 ($X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.4 \sim 0.6$) を想定すると、この帯で生じる変成反応の条件と矛盾しない。この変成圧力は深さ約 9 km に相当し、熱源と考えられる朝倉花崗閃緑岩の冷却年代の 95 Ma にはこの深さに達していたことが推定される。その年代に北部九州の周防変成岩類は、南西部よりも北東部の方がより浅所に達していたと考えられる。

謝 辞

本研究は河上哲生氏と宮崎一博氏に査読していただき、有益なコメントをいただいた。また、故松本達郎名誉教授のご寄付による高千穂奨学資金を助成して頂いた。以上の方々に厚く御礼申し上げます。

文 献

- Bohlen, S. R., Montana, A. and Kerrick, D. M., 1991, Precise determinations of the equilibria kyanite + sillimanite and kyanite + andalusite and a revised triple point for Al₂SiO₅ polymorphs. *Amer. Mineral.*, **76**, 677–680.
- Fukuyama, M., Urata, K. and Nishiyama, T., 2004, Geology and petrology of the Hirao Limestone and the Tagawa metamorphic rocks-with special reference to the contact metamorphism by Cretaceous granodiorite. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **99**, 25–41.
- Hodges, K. V. and Spear, F. S., 1982, Geothermometry, geobarometry and the Al₂SiO₅ triple point at Mt. Moosilauke, New Hampshire. *Amer. Mineral.*, **67**, 1118–1134.
- Hoisch, T. D., 1990, Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **104**, 225–234.
- Holdaway, M. J. and Lee, S. M., 1977, Fe-Mg cordierite stabi-

- ty in high grade pelitic rocks based on experimental, theoretical, and natural observations. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **63**, 175–198.
- 井上 保(Inoue, T.), 1957, 朝倉変成岩地域の地質岩石概報. 福岡学芸大学紀要(理科) (*Bull. Fukuoka Gakugei Univ., Sci.*), **3**, 55–61.
- Johannes, W. and Holtz, F., 1996, *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 335p.
- 唐木田芳文・早坂祥三・長谷義隆(Karakida, Y., Hayasaka, S. and Hase, Y.), 1992, 第2章 中・古生界, 2.9. 白亜紀深成岩類, (2) 北部九州. 日本の地質[九州地方]編集委員会編, 日本の地質9九州地方 (*Regional Geology of Japan, Part 9: Kyushu*), 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 86–88.
- 唐木田芳文・富田 達・松本達郎(Karakida, Y., Tomita, T. and Matsumoto, T.), 1962, 北九州花崗岩類の2・3の問題. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan.*), **68**, 373–376.
- 久保和也・松浦浩久・尾崎正紀・牧本 博・星住英夫・鎌田耕太郎・広島俊男(Kubo, K., Matsuura, H., Ozaki, M., Makimoto, H., Hoshizumi, H., Kamada, K. and Hiroshima, T.), 1993, 福岡地域の地質. 地域地質研究報告(20万分の1地質図幅) (*Geology of the Fukuoka District. With Geological Sheet Map at 1:200,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan).
- 松本達郎(Matsumoto, T.), 1958, 筑紫山地変成岩地域の地質. 鈴木醇教授還暦記念論文集(*Mem. Vol. Prof. Suzuki's 60th birthday*), 141–161.
- 村上允英(Murakami, N.), 1989, 北九州地域産白亜紀花崗岩類の放射年代に関する2, 3の新資料. 別府大学紀要(*Bull. Beppu Univ.*), **30**, 10–17.
- 村上允英・藤本重美(Murakami, N. and Fujimoto, S.), 1957, 北九州田川変成帯南部の地質及び岩石. 岩石鉱物鉱床学会誌(*Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **41**, 164–171.
- 中村大輔(Nakamura, D.), 1996, ザクロ石-黒雲母温度計について-三波川変成岩と大文字接触変成岩への適応とその評価-. 岩石鉱物 (*Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **91**, 165–176.
- Nishimura, Y., 1998, Geotectonic subdivision and areal extent of the Sangun belt, Inner Zone of Southwest Japan. *Jour. Metamorphic Geol.*, **16**, 129–140.
- 小山内康人・正尾 敏・加々美寛雄(Osanai, Y., Masao, S. and Kagami, H.), 1993, 中部九州内帯花崗岩類のRb-Sr全岩アイソクロン年代. 地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 42, 135–150.
- 尾崎正紀・濱崎聡志(Ozaki, M. and Hamasaki, S.), 1991, 福岡県北部に分布する古第三系のフィッシュン・トラック年代. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **97**, 251–254.
- Pattison, D. R. M., 1989, P-T Conditions and the Influence of Graphite on Pelitic Phase Relations in the Ballachulish Aureole, Scotland. *Jour. Petrol.*, **30**, 1219–1244.
- 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.
- 富田幸臣・下山正一・松浦浩久・宮崎一博・石橋 毅・三木 孝(Tomita, S., Shimoyama, S., Matsuura, K., Ishibashi, K. and Miki, T.), 2008, 第2章 地質概説, 第3章 周防変成コンプレックス, 第4章 白亜紀高温低圧型重複変成領域, 大牟田地域の地質, 地域地質研究報告(5万分の1図幅) (*Geology of the Omuta District. Quadrangle Series, 1:50,000*), 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST.), 6–13.
- Wang, G. F., Banno, S. and Takeuchi, K., 1986, Reactions to define the biotite isograd in the Ryoke metamorphic belt, Kii Peninsula, Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **93**, 9–17.
- 渡辺光一郎・林 正雄・英彦山研グループ(Watanabe, K., Hayashi, M. and Hikosan Collaborative Research Group.), 1986, 九州北部, 英彦山地域に分布する火山岩類のフィッシュン・トラック年代. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **92**, 219–230.
- 山田直利(Yamada, N.), 1972, 鳥取-大原地域の三郡変成岩類. 地調月報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **23**, 525–537.

(要 旨)

北野一平・池田 剛, 2012, 朝倉地域に産する周防変成岩類の接触変成作用の温度圧力条件-上昇過程の制約-. 地質雑, **118**, 801–809. (Kitano, I. and Ikeda, T., 2012, Pressure and temperature conditions of contact metamorphism of the Suo metamorphic rocks in Asakura area, Fukuoka Prefecture, Japan: constraints on uplifting process. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **118**, 801–809.)

福岡県朝倉地域に産する周防変成岩類は白亜紀に接触変成作用を被っている. この接触変成帯は泥質岩の鉱物組み合わせを用いて, 南から北へ緑泥石帯, 緑泥石-黒雲母帯, 黒雲母帯, 紅柱石帯の4帯に分けられた. 紅柱石がカリ長石と共存することより, 紅柱石アイソグラッドは次の反応で定義される: 白雲母 + 石英 = 紅柱石 + カリ長石 + 水. 紅柱石帯の変成条件は, ザクロ石-黒雲母地質温度計とザクロ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計より, $560 \pm 50^\circ\text{C}$, $2.3 \pm 0.90 \text{ kbar}$ と推定された. この接触変成作用の熱源を北方の朝倉花崗閃緑岩と仮定すると, 周防変成岩類は95 Maまでに深さ約9 kmまで上昇しており, 遅くとも44 Maまでに地表に達して直方層群に被覆されたと考えられる.