

愛知県作手地域の領家深成-変成コンプレックスの地質

遠藤俊祐*・山崎 徹

Shunsuke Endo and Toru Yamasaki (2013) Geology of the Ryoke Plutono–Metamorphic Complex in the Tsukude area, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 64 (3/4), p. 59–84, 14 figs, 3 tables.

Abstract: Geological mapping (7×10 km²) of the Ryoke Plutono–Metamorphic Complex exposed in the Tsukude area, central Japan was carried out to provide information about geological structure, the nature of plutonism and metamorphism, and their relationships with the neighboring districts. The Ryoke Metamorphic Complex (RMC) of this area is a 4,000 m–thick sequence of north–dipping strata composed mainly of metapelite, metapsammite and metachert, which corresponds to the upper unit of RMC in the Mikawa Plateau. RMC of the Tsukude area was intruded by the post–metamorphic Ryoke granitic rocks, including the Shinshiro Tonalite, Mitsuhashi Granodiorite and Busetsu Granite. In addition, the distribution of pyroxene– and calcic plagioclase–bearing plutonic rocks was newly identified as the Tsukude mafic rocks. Metamorphism in this area is divided into biotite zone and K–feldspar–cordierite zone. The K–feldspar–cordierite zone represents contact aureoles of the Ryoke plutonic rocks. The Shinshiro Tonalite is surrounded by an unusually wide contact aureole and recrystallization conditions of rocks lying above the K–feldspar–cordierite isograd are estimated to be 230–240 MPa and >600 °C, implying emplacement of the Shinshiro Tonalite at 8.5–9.0 km depth.

Keywords: Contact Aureole, Granitic Rocks, Mafic Plutonic Rocks, Ryoke Belt, Tsukude

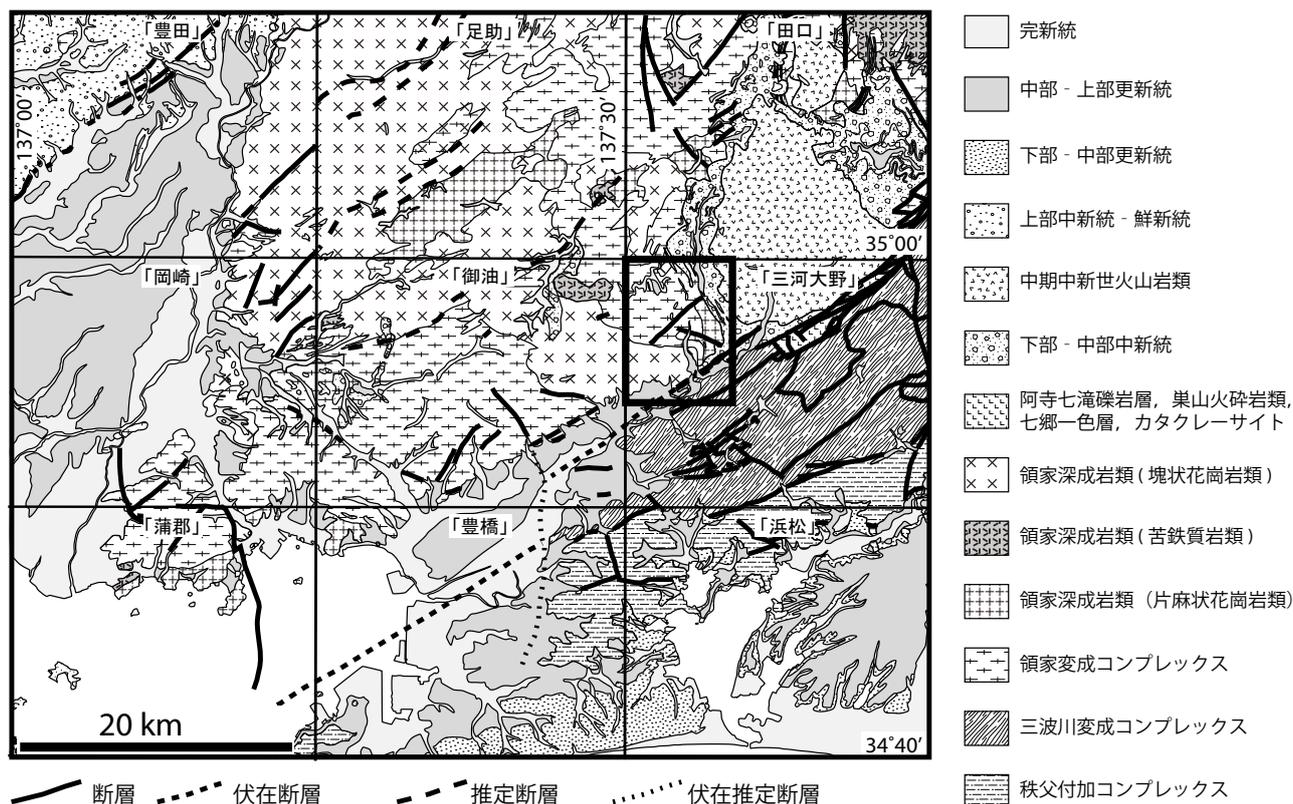
要 旨

5万分の1地形図「三河大野」図郭内において、領家深成-変成コンプレックスが露出する北西部7×10 km² (作手地域) の野外調査を行った。本地域の領家変成岩類は大局的には北傾斜の層理及び片理をもつ変成泥岩、変成砂岩及び変成珪質岩からなり、全体の層厚は4,000 mに達する。この層序は三河高原における領家変成岩類の上部ユニットに対比される。本地域の領家変成岩類には、広域変成作用の後に領家花崗岩類 (新城トータル岩、三都橋花崗閃緑岩、武節花崗岩) が貫入している。また、輝石及びCaに富む斜長石を含む深成岩が分布し、これを作手苦鉄質岩類 (新称) とした。本地域の領家変成岩類は黒雲母帯とその接触変成域のカリ長石堇青石帯に変成分帯され、特に新城トータル岩周囲の接触変成帯の見かけ幅は異常に広い。新城トータル岩周囲のカリ長石堇青石帯の岩石は>600 °C、230–240 MPaの温度-圧力条件で再結晶しており、新城トータル岩の定置深度は8.5–9.0 kmと考えられる。

1. はじめに

西南日本内帯におよそ800 kmにわたって帯状に分布する領家深成-変成コンプレックスは、主に美濃-丹波帯のジュラ紀付加体を原岩とする白亜紀の低圧高温型変成岩類と大量の深成岩類 (花崗岩類と少量の苦鉄質岩類) からなる (例えば、Okudaira *et al.*, 1993; Nakajima, 1994; Suzuki and Adachi, 1998)。また花崗岩類は、低圧高温型の広域変成作用と同時期に活動した古期領家花崗岩類と、広域変成作用の後に領家変成岩類に非調和に貫入し、これに接触変成作用を与えた新期領家花崗岩類に区別できる (例えば、Kutsukake *et al.*, 2003)。領家深成-変成コンプレックスは現在、白亜紀の低温高圧型変成帯である三波川変成コンプレックスと中央構造線を挟んで対面しており、両者は火山弧-海溝系における地下深部プロセスを追究するうえで重要な研究対象である (例えば、Miyashiro, 1972; Aoya *et al.*, 2009; Brown, 2010)。

愛知県東部の三河高原は、領家深成-変成コンプレックスの研究が重点的に行われてきた地域の一つである。第1図に三河高原周辺の地質概略図を示す。特に5万分の1地質図幅「御油」を中心とする範囲は、北傾斜の単斜構造を示す領家変成岩類の層厚約10 km相当が連続的に



第1図 三河高原周辺の地質概略図。20万分の1地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」(牧本ほか, 2004)を簡略化。調査地域を黒太枠で示す。

Fig. 1 Geological outline map around the Mikawa Plateau, central Japan (modified after Makimoto *et al.*, 2004). The study area is indicated by a bold black frame.

露出しており、火山弧の上部～中部地殻断面を観察できる重要な地域である (Miyazaki, 2010)。なお、本稿では領家変成岩類と領家深成岩類の総称として領家深成-変成コンプレックスを使用し、「御油」図幅の領家変成コンプレックス (宮崎, 2008) と同義語として領家変成岩類を用いる。「御油」図幅地域の領家変成岩類と同じ層準は、東方には「三河大野」地域へ連続すると考えられる (第1図)。領家深成岩類や新第三系の分布により、「三河大野」地域の領家変成岩類は周辺地域との連続性が断たれているため、その層序的位置づけが明らかにされていない。また、同地域の領家変成岩類は、新期領家深成岩類の貫入にともなう接触変成作用が重複していることが期待されるが、その検討はなされていない。こうした問題を整理するため、著者らは作手地域の野外調査を行った (調査期間2012年11/29～12/5)。本稿では、まず「御油」図幅とシームレスに接続する領家深成-変成コンプレックスの地質図を作成し、本地域の層序的位置づけを明らかにした。また、本調査で採集した変成泥岩の鉱物組み合わせに基づき本地域の変成分帯を行い、代表的な試料を用いて変成作用の温度-圧力見積りを行った。更に、深成岩類について貫入関係や記載岩石学的特徴にもとづき、周辺地域の領家深成岩類と対比し、その位置づ

けを考察した。なお、野外調査・本稿執筆にあたっては、山崎が領家深成岩類と全岩化学組成の試料調整及び測定を主として担当し、変成岩類と地質図の作成を含む全体の取りまとめについては遠藤が担当した。

本稿における鉱物の化学組成分析には、地質調査総合センター共同利用実験室 (GSJ-Lab) 設置の波長分散型EPMA (JEOL JXA-8800R) を用いた。分析条件は15 kV, 12 nAで、補正計算はBence and Albee (1968) による。また、全岩化学組成分析は、約1 gの粉末試料を900°Cで2時間強熱して灼熱減量 (Loss on ignition: LOI) を計測した後、四ホウ酸リチウム (Li₂B₄O₇) フラックスによる希釈率10:1 (フラックス: 試料) のガラスビードを作成し、GSJ-Lab設置の蛍光X線分析装置 (PANalytical Axios) を用いて行った。分析精度は未知試料と同様の手順で作成した地質調査総合センターの地球化学 (岩石) 標準試料を用いてモニターした。

2. 地質概略

5万分の1地形図「三河大野」図郭内において、領家深成-変成コンプレックスは北西部7×10 km²の範囲 (以下、作手地域または本地域と称する) に露出し、その南側に

は三波川変成コンプレックスや豊川平原の第四系、東側には新第三系(設楽火成複合岩体及び北設垂層群)が分布する(第1図)。作手地域の領家変成岩類には、南側に新城トータル岩、北側に三都橋花崗閃緑岩といった新期領家花崗岩類が非調和に貫入するほか、後述の作手苦鉄質岩類(新称)が貫入している。

本地域に分布する領家変成岩類は、変成泥岩、変成砂岩、変成珪質岩とごく少量の変成苦鉄質岩である。本地域の領家変成岩類を対象とした研究は少ないが、渥美(1984)は新城市権平付近に分布する泥質片麻岩中に紅柱石、珪線石やコランダムの斑状変晶が含まれ、それらの分解物として白雲母とともに真珠雲母(マーガライト)が存在することを報告している。また本地域内に柱石(スカポライト)を含む石灰質片麻岩を産することを述べている。Suzuki *et al.* (1994a)は、本地域(新城市権平)及び山口県柳井地域の領家変成岩類に含まれる碎屑性モナザイトのPbの拡散プロフィールをEPMAで測定し、モナザイト中のPbの拡散係数を決定した。また、新城市権平の泥質片麻岩に含まれる変成モナザイトのCHIME (chemical Th-U-total Pb isochron method: Suzuki and Adachi, 1991) 年代値として 98.0 ± 3.2 Maを報告している。この年代値を含め、西南日本各地の領家変成岩類から得られているCHIMEモナザイト年代はいずれも約100 Maの年代を記録しており、広域変成作用の昇温期(モナザイトが最初に結晶化する角閃岩相低温部 $525 \pm 25^\circ\text{C}$ に達した時期)の年代と解釈されている(Suzuki *et al.*, 1994a; 鈴木ほか, 1994b; Suzuki and Adachi, 1998; Kawakami and Suzuki, 2011)。

本地域の新城トータル岩は「御油」図幅地域の新城市巴山周辺を中心に分布する岩体の東方延長で、主として角閃石黒雲母トータル岩から構成される。新城市横川及び権平付近には、主として石英黒雲母含有輝石角閃石斑れい岩からなる苦鉄質岩類が分布する。後に述べるように、苦鉄質岩類は三都橋花崗閃緑岩にも密接に伴って産するため、両者を区別するために本稿では新城市横川及び権平付近に分布する苦鉄質岩類を作手苦鉄質岩類と呼ぶ。三都橋花崗閃緑岩は5万分の1地質図幅「足助」及び「田口」地域を中心に分布する岩体の南方延長で、主として角閃石黒雲母花崗閃緑岩から構成される。武節花崗岩は「御油」及び「足助」図幅地域に広く分布するが、本地域では小規模な岩脈として産する。

本地域に産する領家深成岩類及び、これと連続する岩体から各種の放射年代値が求められている。そのうち、ほぼ固結年代を示すと解釈される年代については、Morishita and Suzuki (1995)が、新城トータル岩のモナザイトのCHIME年代値として 86.0 ± 4.7 Ma, 85.5 ± 5.5 Ma及び 85.2 ± 3.3 Maを報告している。三都橋花崗閃緑岩については、 84.1 ± 3.1 Ma (Suzuki *et al.*, 1994a)と 83.8 ± 1.3 Ma (鈴木ほか, 1994b)のCHIMEモナザイト年代が報告さ

れている。武節花崗岩については 78.5 ± 2.6 Ma- 75.3 ± 4.9 MaのCHIMEモナザイト年代が報告されている(鈴木ほか, 1994b; Nakai and Suzuki, 2003)。苦鉄質岩類については本地域からの報告はないが、西隣の「御油」図幅地域内の作手岩波付近からNakajima *et al.* (2004)が 72.4 ± 1.2 MaのSHRIMP(高精度高分解能イオンマイクロプローブ)ジルコン年代を報告している。また、本地域北西の「足助」図幅地域では、三都橋花崗閃緑岩と同時期に活動し、液状態で混合した産状を示す苦鉄質岩類の存在が報告されている(山崎, 2012)。

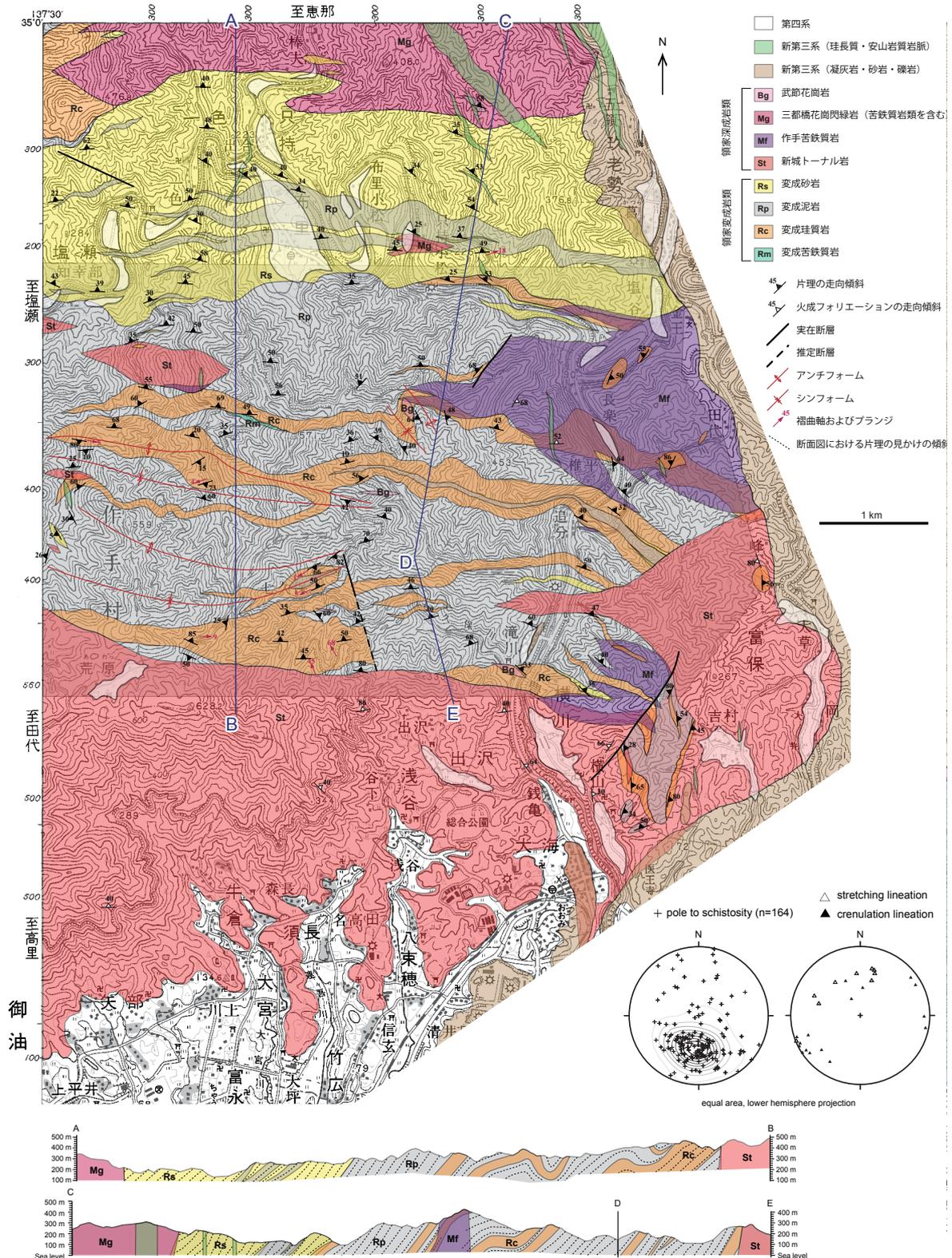
3. 領家変成岩類

3.1 岩相層序とその位置づけ

本地域の領家変成岩類の原岩岩相に基づく地質図及び断面図を第2図に、西隣の「御油」図幅地域(宮崎, 2008)との層序対比を第3図に示す。「御油」図幅地域を中心とする三河高原の領家変成岩類は、北傾斜の層理及び片理をもち、見かけ下位の南方に向かって単調に変成度が上昇する(浅見ほか, 1982; Miyazaki, 2010)。宮崎(2008)は「御油」図幅地域の領家変成岩類を見かけ上位から下位に向かって、上部ユニット(変成珪質岩を挟む変成泥岩卓越層)、中部ユニット(厚い変成砂岩とその下位の変成珪質岩卓越層)、下部ユニット(神原トータル岩の調和貫入岩脈を含む変成砂岩卓越層)に区分した。本地域に露出する領家変成岩類は全体の層厚が4,000 mに達する。そしてこの層準は、新城市塩瀬に分布する変成砂岩やその北方の変成珪質岩、南部の連続性の良い変成珪質岩を鍵層として、「御油」図幅地域の上部ユニットに対比できる(第3図)。「御油」図幅地域の西部から本地域の東部に向かって層理及び片理の一般走向は東北東から西北西へと明瞭に変化する(第1図及び第3図)。それに伴い、本地域では領家変成岩類の一般走向と中央構造線の走向の関係が高角になる。また本地域は南部に新城トータル岩の主岩体が貫入している(第2図)。こうしたことから、「御油」図幅地域に広く露出している中部及び下部ユニットは本地域には現れていない(第3図)。

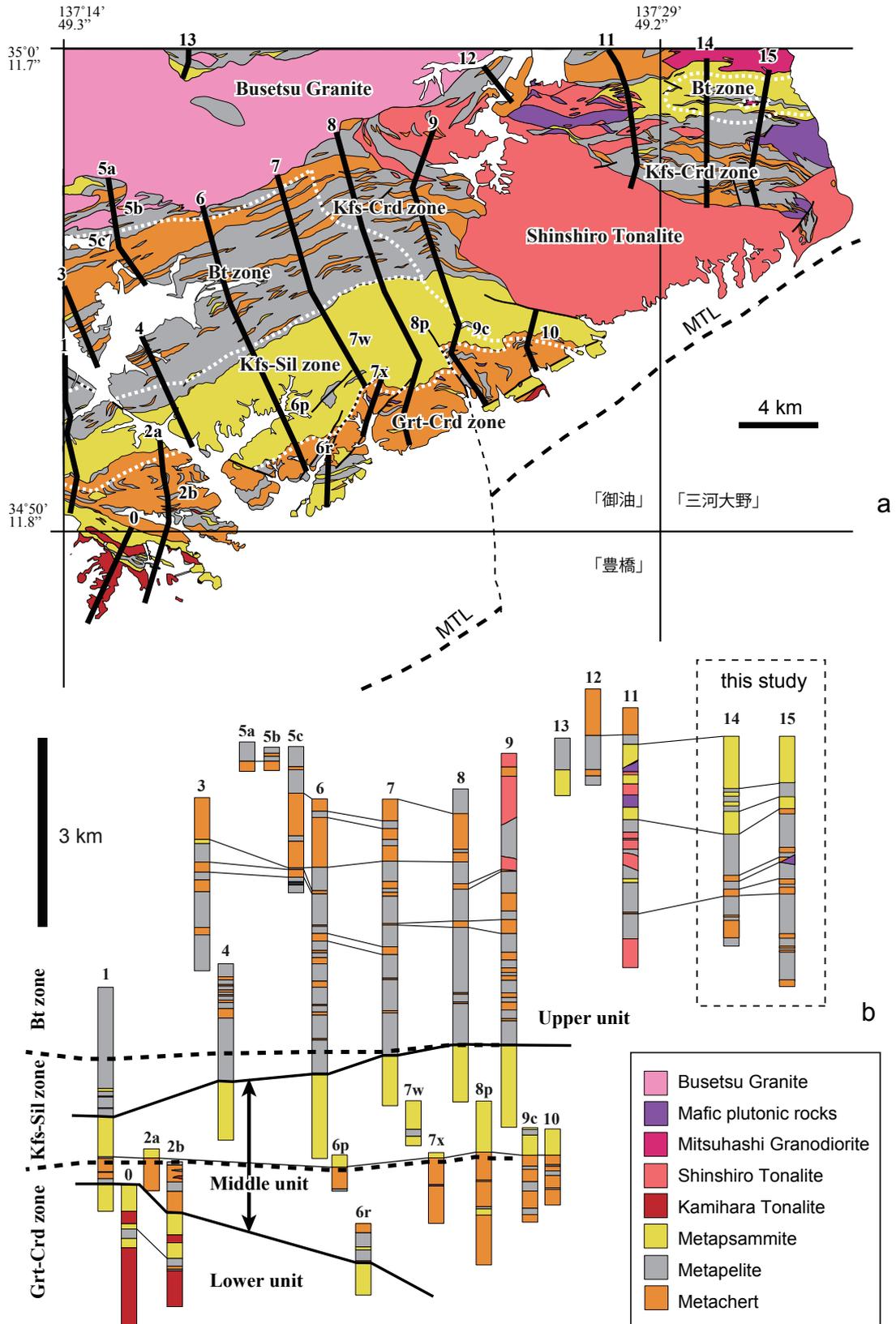
3.2 変形構造

領家変成岩類内部に一貫して発達している巨視的な片理は単一の変形段階(D₁変形: Okudaira *et al.*, 1993; D_m変形: Adachi and Wallis, 2008)による。D₁以前の変形段階は黒雲母や紅柱石の斑状変晶中の包有物の配列による内部面構造として認識されている(Seo and Hara, 1980; Adachi and Wallis, 2008)。領家変成岩類のD₁変形は三波川変成コンプレックス上昇期の主変形と同じく、変成帯の伸長方向とほぼ平行な伸長線構造及び、上盤西ずれの剪断センスにより特徴付けられ(Adachi and Wallis, 2008)、イザナギプレートの左斜め沈み込み



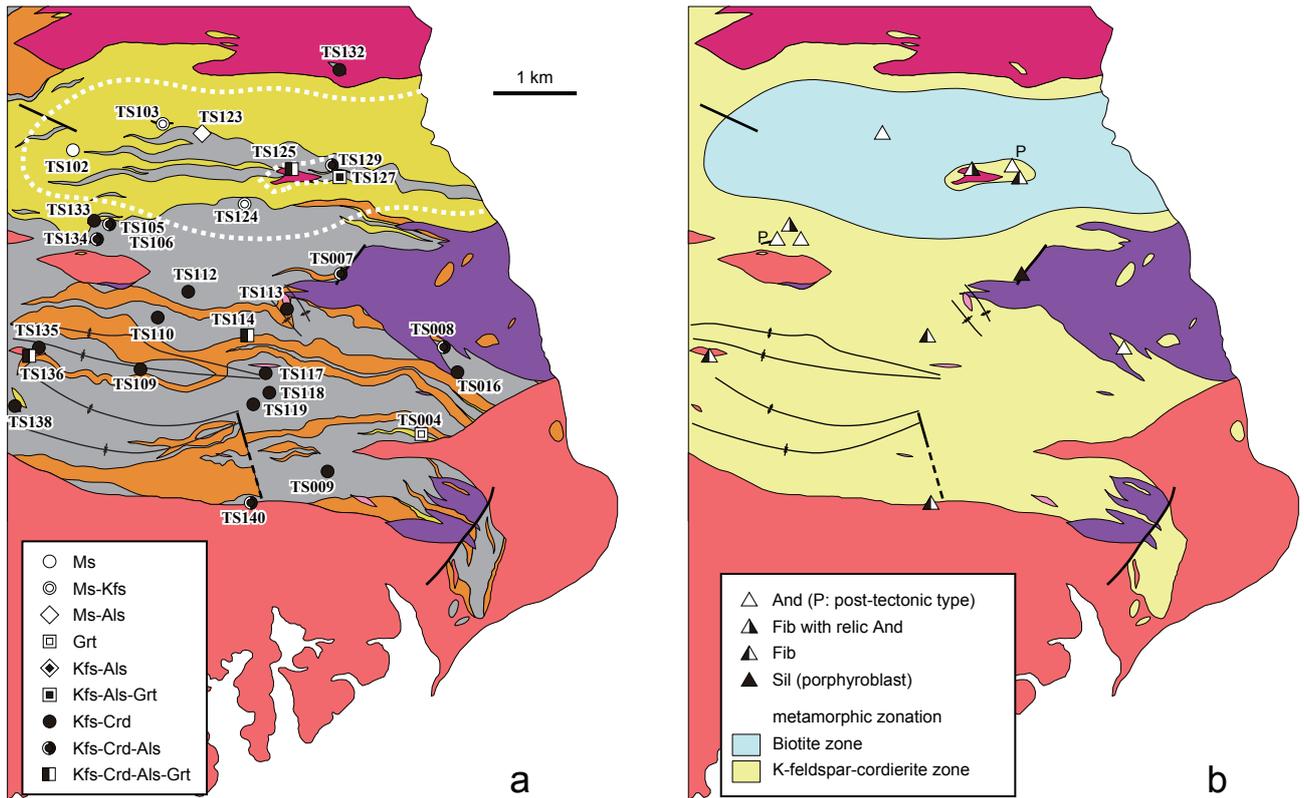
第2図 作手地域の御嶽深成-変成コンプレックスの地質図及び断面図。地質図の基図に国土地理院発行の数値地図(5万分の1「三河大野」)の一部を用いた。野外で測定した変形構造(片理の極, 伸長線構造及び微細褶曲軸)の方位(等面積下半球ステレオ投影)も示した。

Fig. 2 Geological map and cross sections of the Ryoke Plutono-Metamorphic Complex in the Tsukude area. Orientation data of mesoscale deformation structures (pole to schistosity, stretching lineation and crenulation lineation) are also shown on equal area, lower hemisphere stereoplots.



第3図 作手地域(「三河大野」範囲内, 本研究)と「御油」図幅地域(宮崎, 2008)の領家変成岩類の岩相層序対比. (a) 地質図. (b) 柱状図.

Fig. 3 Lithostratigraphic correlation of the Ryoke Metamorphic Complex between the Tsukude area (this study) and the Goyu area (Miyazaki, 2008). (a) Geological map. (b) Columnar sections.



第4図 作手地域の領家変成岩類の変成分帯図。(a) 変成泥岩の鉱物共生(黒雲母, 斜長石, 石英はすべての試料に存在)の分布。白破線はカリ長石堇青石アイソグラッドを示す。背景の地質図の凡例は第3図に同じ。Als: Al_2SiO_5 鉱物, Crd: 堇青石, Grt: ざくろ石, Kfs: カリ長石, Ms: 白雲母。(b) Al_2SiO_5 鉱物の産状。And: 紅柱石, Fib: フィブロライト(繊維状珪線石), Sil: 珪線石。

Fig. 4 Metamorphic zonation of the Ryoke Metamorphic Complex in the Tsukude area. (a) Parageneses of metapelite. The K-feldspar-cordierite isograd is indicated by white broken lines. Als: Al_2SiO_5 phase, Crd: cordierite, Grt: garnet, Kfs: K-feldspar, Ms: muscovite. (b) Mode of occurrences of Al_2SiO_5 phase. And: andalusite, Fib: fibrolite, Sil: sillimanite.

に支配された変形作用と解釈される (Wallis *et al.*, 2009; Okudaira *et al.*, 2009)。D₁以降の変形は、領家深成-変成コンプレックス底部における低角なD₂剪断帯の形成と、東西走向の軸面をもつD₃正立褶曲の形成が認識されている (Okudaira *et al.*, 1993; Okudaira *et al.*, 2009)。D₃褶曲と同じ姿勢・時期の褶曲は三波川変成コンプレックスにも広域的に発達しており、同一のテクトニクスが関与していると考えられる。

本地域のD₁片理は平均的には東西走向で30-60°北に傾斜する(第2図)。D₁片理は岩相境界と平行で、層内褶曲が普遍的にみられる。また、広範囲からの十分な測定数は得られなかったが、D₁伸長線構造として変成泥岩の片理上に伸長した砂質レンズや黒雲母クロットが認識できる(第2図)。本地域西部においてD₁片理は東西走向・急傾斜の軸面をもつシンフォーム、アンチフォーム(D₃褶曲)により曲げられている(第2図)。

3.3 変成分帯

本地域の領家変成岩類は山田ほか(1974)の編纂した

「中部地方領家帯地質図」では堇青石帯と珪線石帯に分帯され、牧本ほか(2004)の編纂した20万分の1地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」では全域が珪線石帯とされている。しかし、実際に鉱物組み合わせを明示した変成分帯は本地域では行われていない。一方、西隣の「御油」図幅地域は変成泥岩の鉱物組み合わせとその微細組織が精査され、広域変成作用とその後の接触変成作用を区別した変成分帯が行われてきた(例えば、浅見ほか, 1982, 三宅ほか, 1992, 宮崎, 2008)。これらのなかで最新の変成分帯図(宮崎, 2008)は、領家変成岩類を低温側から黒雲母帯、カリ長石珪線石帯、ざくろ石堇青石帯の三帯に分け、新期領家花崗岩類の接触変成域をカリ長石堇青石帯とした。広域変成作用に伴うアイソグラッドは層理及び片理にほぼ平行で、「御油」図幅地域の上部ユニットの大部分は黒雲母帯に相当する(第3図)。

第4図aに本地域の変成泥岩の鉱物組み合わせを示す。ここに示した鉱物組み合わせは後退変成作用の影響を取り除いたものである。本地域全域において変成泥岩に初生的な緑泥石は含まれず、変成度は黒雲母帯以上に達し

ている。またカリ長石+堇青石共生が領家深成岩類周囲に広く出現する。したがって宮崎 (2008) の基準を用いて、本地域は黒雲母帯とその接触変成域のカリ長石堇青石帯に変成分帯できる。黒雲母帯の変成泥岩の鉱物組み合わせは黒雲母+白雲母+斜長石+石英+カリ長石+紅柱石であり、紅柱石はカリ長石と共存しない。一方、カリ長石堇青石帯の変成泥岩の鉱物組み合わせは黒雲母+斜長石+石英+カリ長石+堇青石+紅柱石+珪線石+ざくろ石である。また、カリ長石堇青石帯にはフィプロライト(繊維状珪線石)が広く産し、本地域は接触変成帯のみが珪線石安定領域に達したと考えられる(第4図b)。本地域の黒雲母帯には細粒の片岩が、カリ長石堇青石帯にはより粗粒な片岩~片麻岩が卓越する。そのため概略的には、本稿の黒雲母帯とカリ長石堇青石帯の分布は、山田ほか(1974)の堇青石帯(片状ホルンフェルス分布域)と珪線石帯(縞状片麻岩分布域)の分布に対応している。

3.4 岩相

3.4.1 変成泥岩 (Rp)

本地域の領家変成岩類の主要構成岩石であり、岩相変化に富むが、基本的な構成鉱物として石英、斜長石、黒雲母は常に含まれる。上記鉱物に加え、白雲母、カリ長石、堇青石、 Al_2SiO_5 鉱物(紅柱石、珪線石、フィプロライト)、ざくろ石のうち、いくつかが共存することがある。多くの場合、堇青石は緑褐色のピナイトや粗粒白雲母に、 Al_2SiO_5 鉱物は微細な白色雲母集合体に完全に置き換えられている。また、副成分鉱物として電気石、ジルコン、アパタイト、炭質物、イルメナイト、磁硫鉄鉱などが普遍的に含まれる。

新城市布里^{ふり}周辺に分布する黒雲母帯の変成泥岩は、炭質物を含み暗灰色を呈する細粒の片岩(白雲母黒雲母斜長石石英片岩)で、伸長した灰色の変成砂岩レンズを含む(第5図a)。また、随所に長さ数cm程度の紅柱石結晶を含む厚さ数cm以下の層準を挟む(第5図b)。鏡下では、黒雲母及び白雲母の形態定向配列による片理が発達し、また層内褶曲した石英に富む薄層を普遍的に挟む。白雲母は基質の片理の上に静的に成長していることも多い(第6図a)。

新城市布里南西のカリ長石堇青石アイソグラッド付近の変成泥岩は細粒で、黒雲母帯の泥質片岩と肉眼観察では大きな違いは認められない。しかし鏡下では、紅柱石を含む泥質片岩の場合、基質の片理の上に静的に成長したカリ長石を特徴的に含む(第6図b)。新城トータル岩近傍のカリ長石堇青石帯の変成泥岩は、緻密硬堅で粗粒な片岩ないし片麻岩(第6図c)、またはグラノフェルス(第6図d)である。堇青石は自形の短柱状結晶をなし、丸みを帯びた石英や黒雲母、カリ長石、斜長石、炭質物などをポイキロプラスト状に含む。フィプロライトが堇青石中に包有されていることがあるが(第6図c)、紅柱石は残存

していない。

新城市椎平の作手苦鉄質岩類周囲に分布する変成泥岩は粗粒な片麻岩で、露頭においてもピナイト化した堇青石及び Al_2SiO_5 鉱物(紅柱石、珪線石)の斑状変晶が目立つ(第5図c)。また、フィプロライトは本地域のカリ長石堇青石帯に普遍的であるが(第4図b)、斑状変晶をなす珪線石(第6図e)は作手苦鉄質岩類近傍にのみ産する。

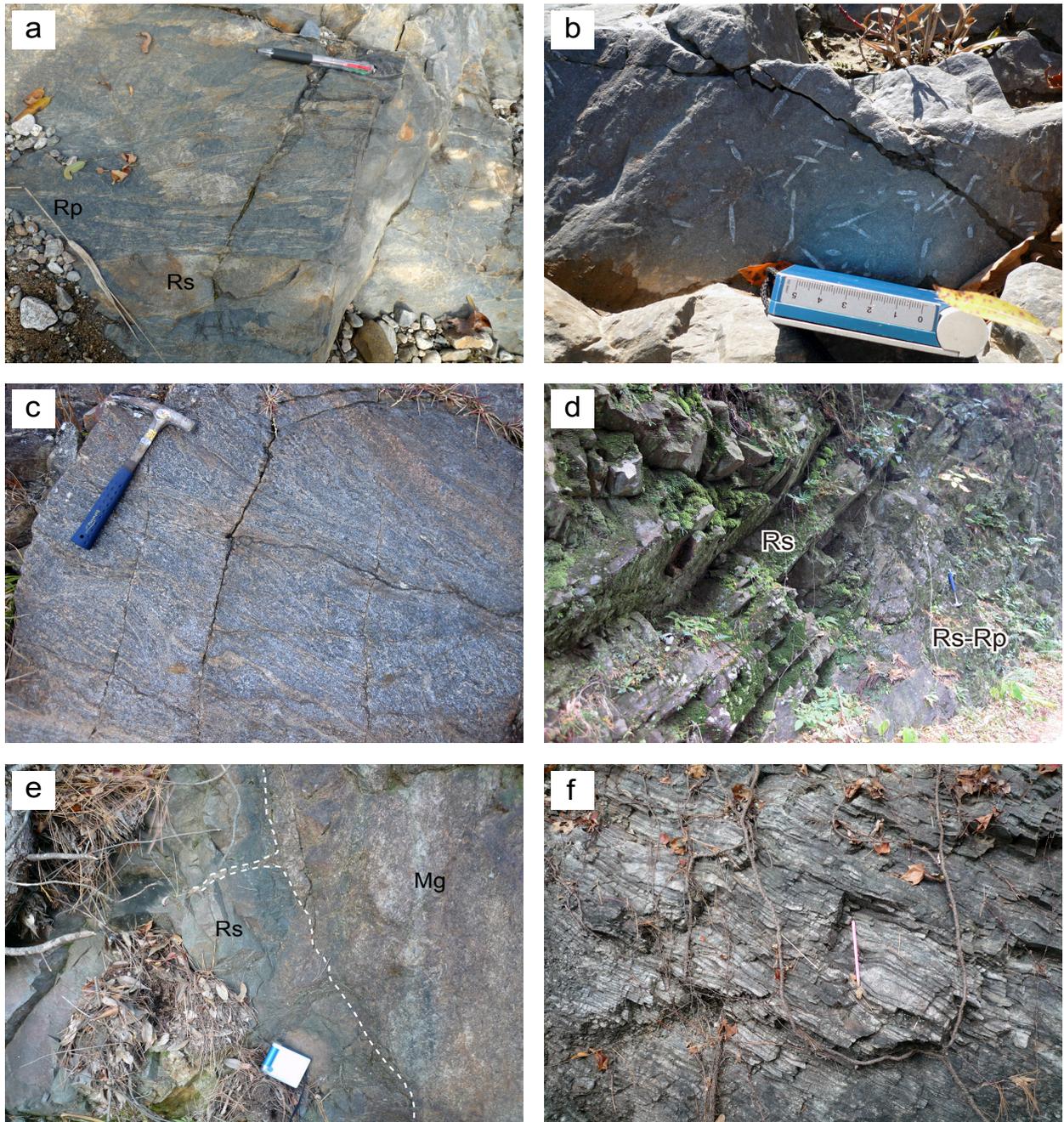
新城市只持^{ただもち}小松^{こまつ}北方の三都橋花崗閃緑岩と直接する露頭の変成泥岩は、アメーバ状の堇青石仮像(ピナイト)を含むカリ長石斜長石黒雲母石英グラノフェルスである。また只持小松に小規模に分布する三都橋花崗閃緑岩の周囲には、ざくろ石、堇青石仮像、カリ長石、紅柱石、フィプロライトを含む黒雲母斜長石石英片麻岩(第6図f)を産する。ざくろ石のコアは微細な石英及び気液二相の流体を主とするダスト状包有物に富む。

3.4.2 変成砂岩 (Rs)

本地域の変成砂岩は様々なスケールで変成泥岩と互層し、大部分は泥質部の量が優勢である。そのため、第2図に変成泥岩として塗色した領域にも変成砂岩は普遍的に産する。一方、泥質部に乏しい変成砂岩のまとまった分布が本地域北部にみられる(第2図)。この変成砂岩の分布は、「御油」図幅内の新城市塩瀬から連続するもので、本地域の領家変成岩類の見かけ上位の層厚1,000 m以上を占めている(第3図)。露頭において変成砂岩自体の片理は弱い、数cm間隔で挟まるフィルム状泥質層(黒雲母濃集層)による明瞭な面構造が発達する(第5図d)。本地域北部の泥質部に乏しい変成砂岩(黒雲母カリ長石斜長石石英グラノフェルス)には三都橋花崗閃緑岩が貫入している(第5図e)。その貫入面付近において変成砂岩はやや粗粒になり、黒雲母は直径1 mm前後のクロットを形成するようになる。三都橋花崗閃緑岩周囲のカリ長石堇青石アイソグラッドは、この変成砂岩分布域内に位置していると考えられるが、泥質部に乏しい変成砂岩の鉱物組み合わせ(黒雲母+カリ長石+斜長石+石英)は単調で変化がみられない。

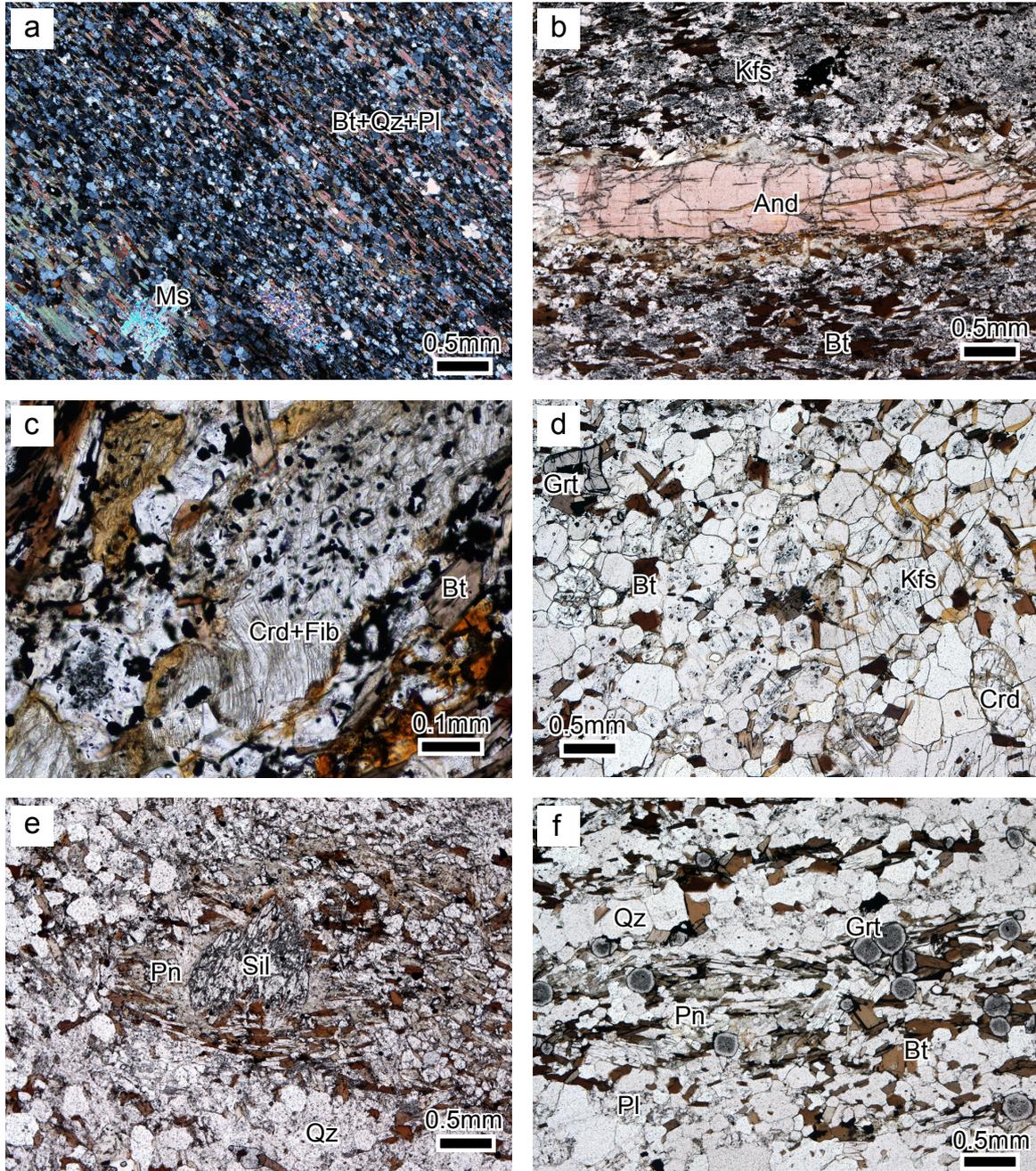
3.4.3 変成珪質岩 (Rc)

本地域の領家変成岩類は変成泥岩卓越層中に連続性の良い変成珪質岩層を挟んでいる(第2図)。また、本地域北西端には「御油」図幅内の新城市^{ひこぼろ}彦坊山から連続する変成珪質岩が分布する(第3図)。変成珪質岩の露頭は、厚さ数cmの珪質層と黒雲母に富む薄い泥質層が有律互層をなし(第5図f)、原岩の層状チャートに由来する構造と考えられる。この層状構造は隣接する岩石の片理や岩相境界面と大きく斜交しない。また大規模褶曲のヒンジ付近では、微細褶曲や波長数10 cm程度の開いた褶曲が発達している。本地域の変成珪質岩は石英を主体とし、少量の黒雲母、斜長石、ざくろ石などを含むグラノフェ



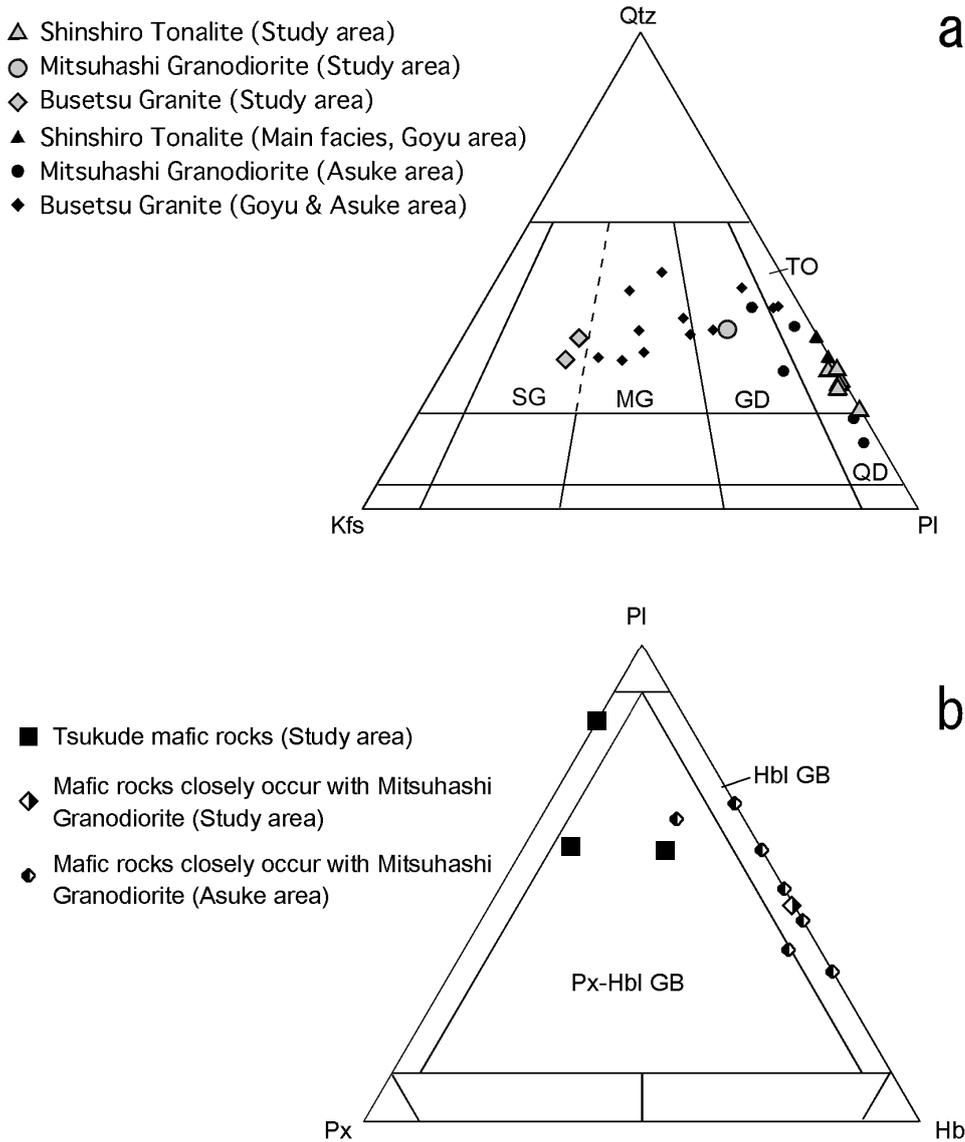
第5図 領家変成岩類の野外における産状。(a) 黒雲母帯の変成砂泥岩。多量の変成砂岩レンズ (Rs) を含む泥質片岩 (Rp)。新城市布りの寒狭川右岸。(b) 黒雲母帯の変成泥岩。柱状の紅柱石を含む層準面。布りの寒狭川右岸。(c) 作手苦鉄質岩類近傍のカリ長石堇青石帯の粗粒な泥質片麻岩。新城市権平の豊川左岸。(d) 黒雲母帯の変成砂岩 (Rs) 及び変成砂岩-変成泥岩互層 (Rs-Rp)。新城市塩瀬東方の道路沿い。(e) 三都橋花崗閃緑岩 (Mg) に貫入される変成砂岩 (Rp)。新城市只持小松北方の林道沿い。(f) カリ長石堇青石帯の変成珪質岩。新城市七久保の道路沿い。

Fig. 5 Field photographs of the Ryoke metamorphic rocks in the Tsukude area. (a) Pelitic schist (Rp) with abundant metapsammite lenses (Rs). Biotite zone. (b) Andalusite-bearing stratum of metapelite. Biotite zone. (c) Coarse-grained pelitic gneiss. K-feldspar-cordierite zone around the Tsukude mafic rocks. (d) Foliated metapsammite (Rs) and psammopelitic schist (Rs-Rp). Biotite zone. (e) Metapsammite (Rs) intruded by the Mitsuhashi Granodiorite (Mg). (f) Metachert. K-feldspar-cordierite zone.



第6図 変成泥岩の鏡下写真。(a) 黒雲母帯の白雲母黒雲母斜長石石英片岩 (TS103)。クロスニコル。(b) カリ長石堇青石帯の紅柱石カリ長石含有黒雲母斜長石石英片岩 (TS134)。オープンニコル。(c) カリ長石堇青石帯 (新城トール岩近傍) のカリ長石堇青石含有黒雲母斜長石石英片麻岩 (TS140)。オープンニコル。(d) ざくろ石含有斜長石黒雲母堇青石カリ長石石英グラノフェルス (TS136)。オープンニコル。(e) カリ長石堇青石帯 (作手苦鉄質岩類近傍) の珪線石堇青石カリ長石含有黒雲母斜長石石英片岩 (TS007)。オープンニコル。(f) カリ長石堇青石帯 (新城市只持小松) のざくろ石堇青石カリ長石含有斜長石石英白雲母黒雲母片麻岩 (TS125)。オープンニコル。And: 紅柱石, Bt: 黒雲母, Crd: 堇青石, Fib: フィブロライト, Grt: ざくろ石, Kfs: カリ長石, Ms: 白雲母, Pl: 斜長石, Pn: ピナイト, Qz: 石英, Sil: 珪線石。

Fig. 6 Photomicrographs of the Ryoke metapelitic rocks from the Tsukude area. (a) Muscovite-bearing schist (TS103) in the biotite zone. Crossed polarized light (XPL). (b) Andalusite- and K-feldspar-bearing schist (TS134) in the K-feldspar-cordierite zone. Plane polarized light (PPL). (c) Cordierite- and fibrolite-bearing gneiss (TS140) in the K-feldspar-cordierite zone. PPL. (d) Cordierite- and K-feldspar-bearing granulites (TS136) in the K-feldspar-cordierite zone. PPL. (e) Sillimanite-bearing gneiss in the K-feldspar-cordierite zone (TS007). PPL. (f) Garnet-bearing gneiss (TS125) in the K-feldspar-cordierite zone. PPL. And: andalusite, Bt: biotite, Crd: cordierite, Fib: fibrolite, Grt: garnet, Kfs: K-feldspar, Ms: muscovite, Pl: plagioclase, Pn: pinite, Qz: quartz, Sil: sillimanite.



第7図 作手及び隣接地域の領家深成岩類のモード組成。(a) 花崗岩類。(b) 斑れい岩類。「御油」図幅地域及び「足助」図幅地域のモードデータはそれぞれ西岡 (2008) 及び山崎 (2012) による。Qtz: 石英, Pl: 斜長石, Kfs: カリ長石, Px: 輝石, Hbl: 普通角閃石, QD: 石英閃緑岩, TO: トーナル岩, GD: 花崗閃緑岩, MG: モンゾ花崗岩, SG: 閃長花崗岩, GB: 斑れい岩。Qtz-Kfs-Pl図及びPl-Px-Hbl図の岩石区分はIUGS (Le Maitre, 2002) に従った。

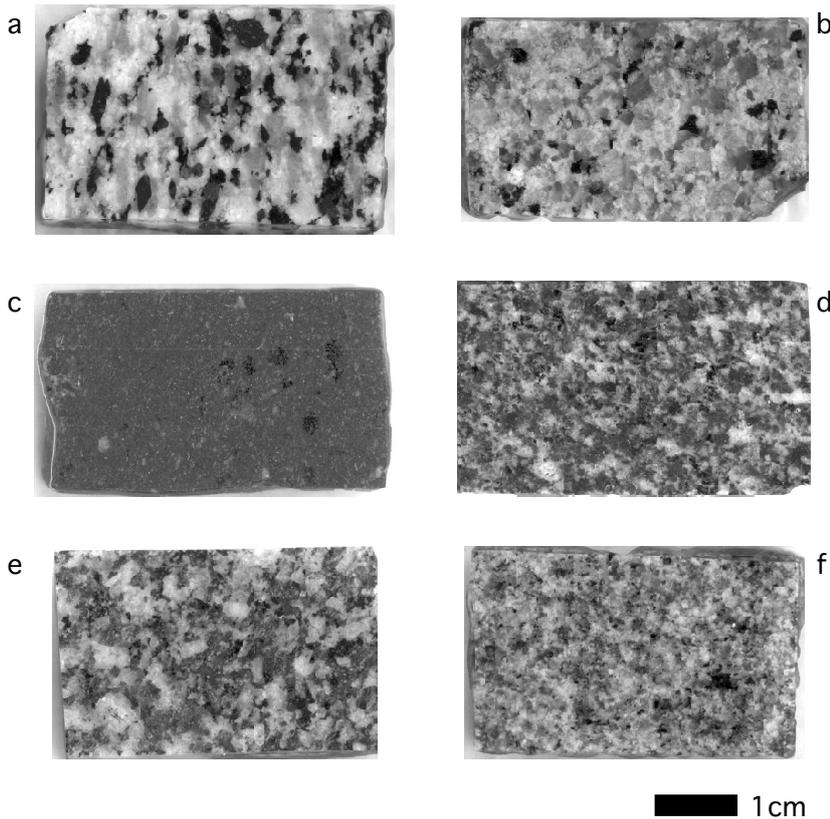
Fig. 7 Modal composition of the Ryoke plutonic rocks in the Tsukude and neighboring areas. (a) Granitic rocks. (b) Gabbroic rocks. Modal data of the Goyu and Asuke districts are from Nishioka (2008) and Yamasaki (2012), respectively. Qtz: quartz, Pl: plagioclase, Kfs: K-feldspar, Px: pyroxene, Hbl: hornblende, QD: quartz diorite, TO: tonalite, GD: granodiorite, MG: monzogranite, SG: syenogranite, GB: gabbro. Rock classification of the diagrams is after IUGS (Le Maitre, 2002).

ルスで、鉱物組み合わせは変化に乏しい。本地域における変成珪質岩の分布の大部分はカリ長石堇青石帯に含まれる。そのため、接触変成作用時の静的再結晶による石英の粒径変化が顕著である。

3.4.4 変成苦鉄質岩 (Rm)

本地域において変成苦鉄質岩は稀であるが、新城市

つくでしおせ
作手塩瀬南東において暗緑色の苦鉄質片麻岩が変成珪質岩と変成泥岩に整合的に挟まれて産する。単斜輝石(デオプサイド)、斜長石(An[100×Ca/(Ca + Na) in atomic ratio]₉₄₋₉₅)、角閃石(ホルンブレンド~アクチノ閃石)を主体とし、少量のチタナイト、方解石、石英、アパタイトを含む。Caに富む構成鉱物から交代作用を受けている可能性が高く、渥美(1984)の記述にある石灰質片麻岩との



第8図 領家深成岩類のスラブ写真。(a) 新城トータル岩 (主岩相)。(b) 三都橋花崗閃緑岩。(c) 三都橋花崗閃緑岩中の細粒苦鉄質岩。(d) 作手苦鉄質岩類 (苦鉄質鉱物が多く片麻状構造が顕著な部分)。(e) 作手苦鉄質岩類 (苦鉄質鉱物が少なく片麻状構造が弱い部分)。(f) 武節花崗岩。

Fig. 8 Slab photographs of the Ryoke plutonic rocks. (a) Shinshiro Tonalite (Main facies). (b) Mitsuhashi Granodiorite. (c) Fine-grained mafic rock in the Mitsuhashi Granodiorite. (d) Tsukude mafic rocks (mafic mineral-rich and strongly foliated portion). (e) Tsukude mafic rocks (mafic mineral-poor and weakly foliated portion). (f) Busetsu Granite.

関係が伺われる。

4. 領家深成岩類

本地域に分布する領家深成岩類は、分布面積の広い順に、新城トータル岩、作手苦鉄質岩類、三都橋花崗閃緑岩とそれに密接に伴って産する苦鉄質岩類、そして武節花崗岩である(第2図)。これらの領家深成岩類のモード組成を第7図に示す。また、第7図には、比較のために周辺地域に分布する同岩相のモード組成の文献値も示している。深成岩類の名称の定義はInternational Union of Geological Sciences (IUGS) Subcommission of the System of Igneous Rocksの、Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms (Le Maitre, 2002)に従う。なお、本稿において「片麻状 (gneissose)」という語は、単に面構造を有することを意味する。

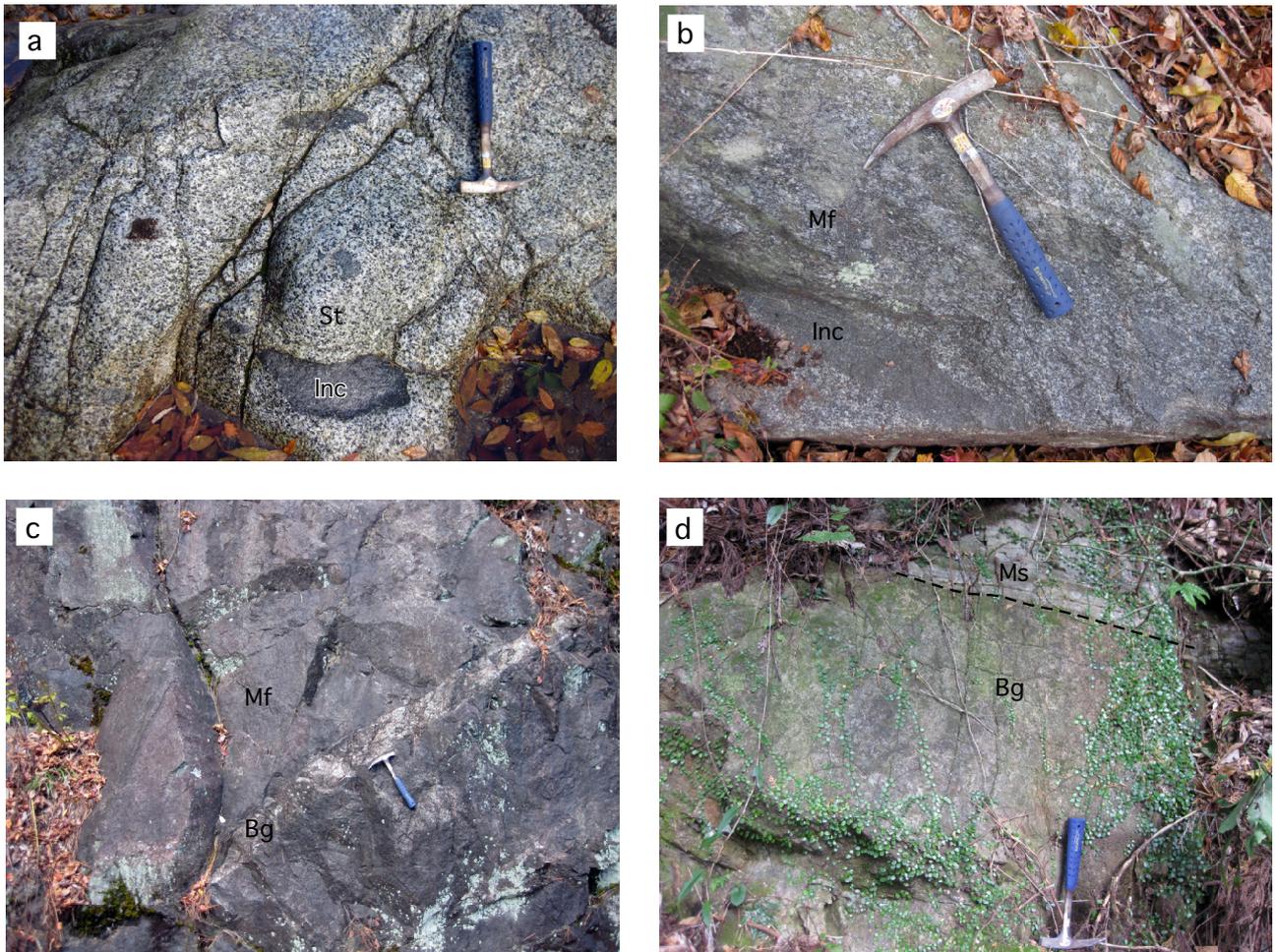
4.1 新城トータル岩 (St)

新城トータル岩は、^{つくであらわ}新城市作手荒原から^{とみやす}富保を結ぶ地域以南に広く分布する。南縁は第四系及び新第三系礫岩類に覆われて分布が不明瞭であるが、池田ほか(1974)によると、豊川の北西で中央構造線を境に圧砕された新城トータル岩が三波川変成コンプレックスに接するとされている。新城トータル岩の南東縁及び東縁は、新第三系の北設亜層群 (Kato, 1962)に覆われる。新城市横川東方

の作手苦鉄質岩類との直接の貫入関係は不明である。

本地域に分布する新城トータル岩は、片麻状構造をもつ中粒角閃石黒雲母トータル岩を主体とする(第8図a)。この岩相は大友(1985)による中心岩相、西岡(2008)による主岩相に相当する(第7図a)。長径数cmから数10cmの楕円形ないしレンズ状の暗色包有物をしばしば含む(第9図a)。片麻状構造は野外において非常に明瞭な場合と、塊状に近く不明瞭な場合とがある。領家変成岩類と接する岩体北縁では中粒ないし細粒の黒雲母トータル岩が産し、これらの岩相は大友(1985)による周縁岩相、西岡(2008)による黒雲母トータル岩相に相当する。新城市出沢北西の新城トータル岩と領家変成岩類との境界付近では、境界から数メートル程度、細粒の黒雲母トータル岩が分布し、中粒の角閃石黒雲母トータル岩へ漸移する。黒雲母トータル岩にはほとんど片麻状構造は認められない。

新城トータル岩を主として構成する中粒片麻状角閃石黒雲母トータル岩は、完晶質粒状で、構成鉱物の粒径は5.0 mmから0.5 mm程度に連続的に変化する(第10図a)。主成分鉱物は斜長石、石英、黒雲母、普通角閃石で、ごく少量のカリ長石、イルメナイト、アバタイト、ジルコンを含む。斜長石は半自形-自形、柱状(長径3.0-1.0 mm)で顕著な累帯構造を示す。石英は他形、粒間充填状で、弱い波動消光を示す。黒雲母は半自形-他形(長径5.0-0.5 mm以下)で、 $Y \cong Z$ = 赤褐色、 X = 淡褐色の



第9図 領家深成岩類の野外における産状。(a) 新城トータル岩中の暗色包有物。新城市出沢銭亀の豊川河岸(鮎滝)。St: 新城トータル岩, Inc: 暗色包有物。(b) 作手苦鉄質岩類中の暗色包有物。新城市^{すざわがめ}玖老勢井戸下の林道沿い。Mf: 作手苦鉄質岩類, Inc: 暗色包有物。(c) 作手苦鉄質岩類に貫入する武節花崗岩の岩脈。新城市^{すざわがめ}玖老勢井戸下の林道沿い。Mf: 作手苦鉄質岩類, Bg: 武節花崗岩岩脈。(d) 変成珪質岩に貫入する武節花崗岩。新城市^{すざわはしづめ}出沢橋詰の道路脇。Bg: 武節花崗岩, Ms: 変成珪質岩, 破線: 両岩相の境界。

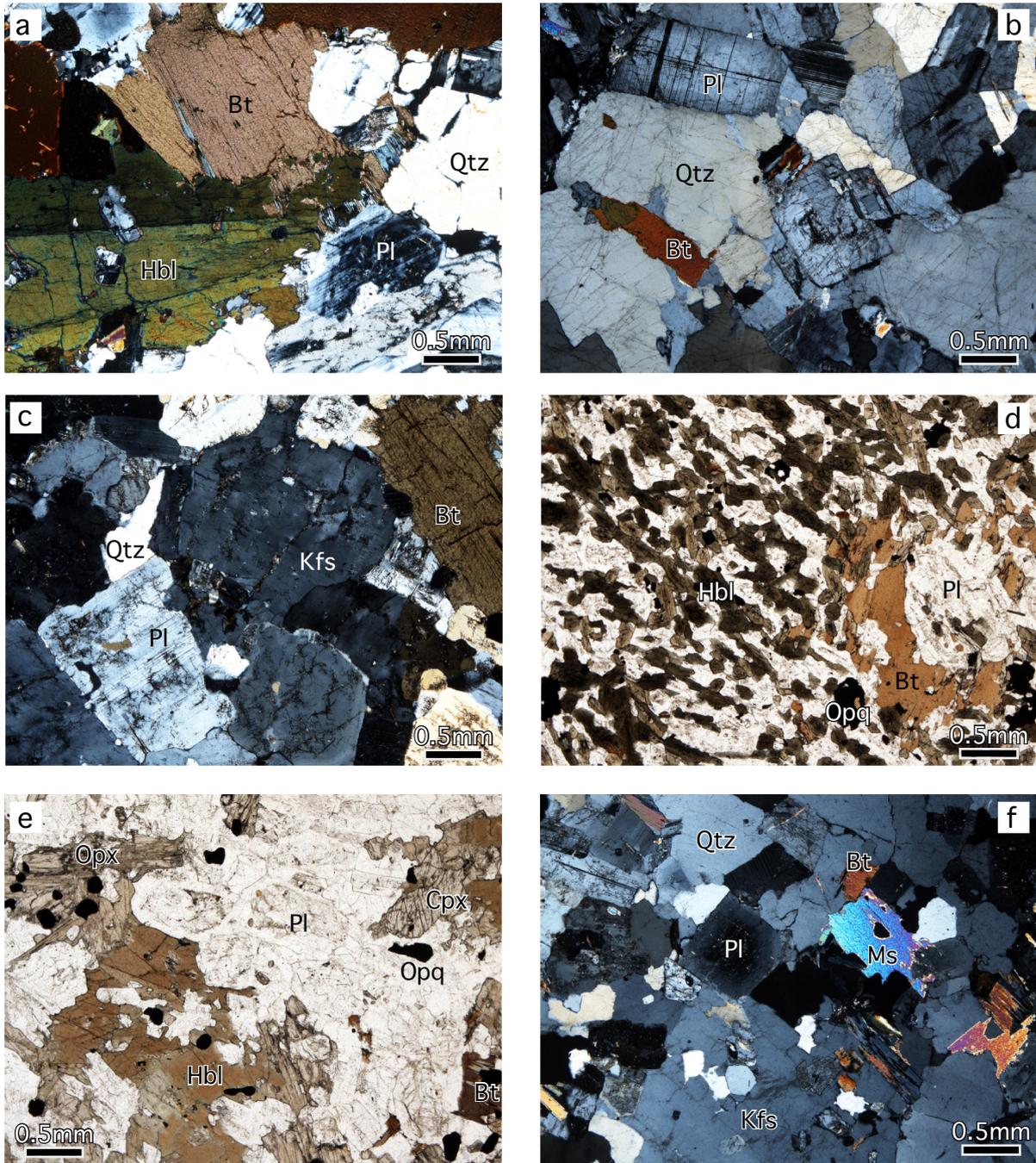
Fig. 9 Field occurrence of the Ryoke plutonic rocks. (a) Dark inclusion in the Shinshiro Tonalite. St: Shinshiro Tonalite, Inc: dark inclusion. (b) Dark inclusion in gneissose Tsukude mafic rocks. Mf: Tsukude mafic rocks, Inc: dark inclusion. (c) Busetsu Granite dike intruding the Tsukude mafic rocks. Mf: Tsukude mafic rocks, Bg: Busetsu Granite dike. (d) Busetsu Granite intruding the Ryoke Metamorphic Complex. Bg: Busetsu Granite, Ms: Metasiliceous rock of the Ryoke Metamorphic Complex, dashed line: boundary between the Busetsu Granite and metasiliceous rock of the Ryoke Metamorphic Complex.

多色性を示す。角閃石は半自形、長柱状(長径5.0-1.0 mm)でY = Z = 褐色-帯緑褐色, X = 淡褐色の多色性を示す。しばしば、褐色のコアと帯緑褐色のリムから構成される累帯構造を示すほか、単純双晶が認められる場合もある(第10図a)。角閃石は粒状のイルメナイトをしばしば包有する。領家変成コンプレックスとの境界付近に産する中-細粒黒雲母トータル岩(第10図b)は、角閃石をほとんど含まず、後に述べる三都橋花崗閃緑岩や武節花崗岩と野外において類似するが、斜長石の自形性が強い点、カリ長石をほとんど含まない点、そして白雲母を欠く点において区別される。

4.2 三都橋花崗閃緑岩 (Mg)

三都橋花崗閃緑岩は、新城市^{いっしき}一色北西から新城市^{ふくがわ}副川西方を結ぶ地域以北に産し、本地域に北接する「田口」地域へと連続する。5万分の1地質図幅「足助」地域内の新城市^{つくでもりよし}作手守義を中心とする地域に分布する岩体の南東縁である。領家変成岩類に貫入している(第5図e)。

本地域に分布する三都橋花崗閃緑岩は、弱い片麻状構造を示す中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩(第8図b)及び黒雲母花崗岩である。本地域に分布する中粒片麻状角閃石黒雲母花崗閃緑岩は、「足助」地域の三都橋花崗閃緑岩相に比べてややカリ長石が多い(第7図a)。「足助」地域において三都橋花崗閃緑岩はざくろ石含有粗粒優白質トー



第10図 領家深成岩類の鏡下写真。(a) 新城トータル岩主岩相(角閃石-黒雲母トータル岩)。クロスニコル。(b) 新城トータル岩周縁相(黒雲母トータル岩)。クロスニコル。(c) 三都橋花崗閃緑岩(角閃石含有黒雲母花崗閃緑岩)。クロスニコル。(d) 三都橋花崗閃緑岩中の細粒苦鉄質岩(黒雲母石英含有角閃石細粒斑れい岩)。オープンニコル。(e) 作手苦鉄質岩類(石英黒雲母含有輝石角閃石斑れい岩)。オープンニコル。(f) 武節花崗岩(黒雲母白雲母花崗岩)。クロスニコル。Pl:斜長石, Kfs:カリ長石, Qtz:石英, Opx:斜方輝石, Cpx:単斜輝石, Hbl:普通角閃石, Bt:黒雲母, Ms:白雲母, Opq:不透明鉱物。

Fig. 10 Photomicrographs of the Ryoke plutonic rocks. (a) Shinshiro Tonalite, main facies (Hbl-Bt tonalite). Crossed polarized light (XPL). (b) Shinshiro Tonalite, marginal facies (Bt tonalite). XPL. (c) Mitsuhashi Granodiorite (Hbl-bearing Bt granodiorite). XPL. (d) Fine-grained gabbro in Mitsuhashi Granodiorite (Fine-grained Bt-Qtz-bearing Hbl gabbro). Plane polarized light (PPL). (e) Tsukude mafic rocks (Qz-Bt-bearing pyroxene-Hbl gabbro). PPL. (f) Busetsu Granite (Bt-Ms granite). XPL. Pl: plagioclase, Kfs: K-feldspar, Qtz: quartz, Opx: orthopyroxene, Cpx: clinopyroxene, Hbl: hornblende, Bt: biotite, Ms: muscovite, Opq: opaque minerals.

第1表 作手苦鉄質岩類の斜方輝石及び斜長石の化学組成.

Table 1 Representative compositions of orthopyroxene and plagioclase in the Tsukude mafic rocks.

sample	TS005	TS005	TS007B	TS007B	TS017	TS017	TS005	TS007B	TS017	TS005	TS007B	TS017
mineral	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl
core/rim	core	core	core	core	core	core	core	core	core	rim	rim	rim
SiO ₂	52.63	52.49	53.62	53.63	52.43	51.76	46.58	45.69	46.66	55.13	53.21	54.26
TiO ₂	0.15	0.15	0.20	0.20	0.23	0.40	0.00	0.00	1.47	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.90	1.25	1.31	1.50	1.11	2.13	34.36	33.95	8.07	27.94	29.20	28.45
Cr ₂ O ₃	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.06	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
NiO	0.04	0.04	0.04	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.04
FeO*	29.19	28.68	27.69	27.07	28.29	27.20	0.57	0.05	20.71	0.20	0.04	0.09
MnO	1.04	1.12	0.70	0.64	0.75	0.77	0.00	0.01	0.38	0.03	0.02	0.00
MgO	14.57	14.34	15.50	15.63	14.30	13.73	0.03	0.02	10.07	0.00	0.00	0.00
CaO	0.93	1.16	1.50	2.06	1.24	2.17	17.84	17.53	10.53	10.35	11.33	10.93
Na ₂ O	0.10	0.16	0.13	0.15	0.14	0.17	1.59	1.56	0.95	5.68	4.98	5.29
K ₂ O	0.00	0.01	0.03	0.04	0.01	0.05	0.01	0.01	0.42	0.09	0.07	0.05
Total	99.55	99.43	100.73	100.98	98.51	98.50	100.98	98.85	99.29	99.43	98.86	99.12
O=	6	6	6	6	6	6	8	8	8	8	8	8
Si	2.03	2.03	2.03	2.02	2.04	2.01	2.13	2.13	2.41	2.50	2.43	2.47
Ti	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
Al	0.04	0.06	0.06	0.07	0.05	0.10	1.85	1.86	0.49	1.49	1.57	1.53
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe	0.94	0.93	0.88	0.85	0.92	0.88	0.02	0.00	0.89	0.01	0.00	0.00
Mn	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
Mg	0.84	0.83	0.87	0.88	0.83	0.80	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.00
Ca	0.04	0.05	0.06	0.08	0.05	0.09	0.87	0.87	0.58	0.50	0.55	0.53
Na	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.14	0.14	0.09	0.50	0.44	0.47
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00
Total	3.94	3.94	3.94	3.95	3.93	3.93	5.02	5.01	5.35	5.01	5.01	5.00
Mg#	47	47	50	51	47	47	-	-	-	-	-	-
An	-	-	-	-	-	-	86	86	86	50	56	53

*total Fe as FeO.

ナル岩や中-細粒角閃石石英閃緑岩など岩相変化に富み(山崎, 2012), モード組成も多様である(第7図a)。したがって, 本地域に分布する三都橋花崗閃緑岩の岩相及びモード組成変化もそのような多様性の一部であると考えられる。

三都橋花崗閃緑岩の代表的な岩相である中粒片麻状角閃石黒雲母花崗閃緑岩は, 完晶質で鉱物の粒径が3.0 mmから0.5 mm程度に連続的に変化する(第10図c)。主成分鉱物は斜長石, 石英, 黒雲母, カリ長石及び普通角閃石で, 少量の不透明鉱物, アパタイト, ジルコンを伴う。斜長石は半自形, 長柱状(長径2.0-1.0mm)で, 弱い累帯構造を示す。結晶内部に不定形の石英を含み, モザイク状の消光を示すことがある。石英は他形, 粒間充填状で, 弱い波動消光を示す。黒雲母は半自形(長径3.0-0.5 mm)で,

Y ≐ Z = 黒褐色, X = 淡褐色の多色性を示す。黒雲母はしばしば粒状のアパタイト・ジルコンを包有する。カリ長石は他形・粒間充填状ないし半自形短柱状(長径3.0-1.0 mm)で, パーサイト構造や単純双晶を示すことがある。角閃石は半自形で, 著しく変質している。

三都橋花崗閃緑岩の分布域には細-中粒の苦鉄質岩類が貫入している, あるいは包有されていることがある。この苦鉄質岩類と三都橋花崗閃緑岩との成因的關係は明らかではないが, 本地域においては分布範囲が小さく地質図には表現できないスケールであり, かつ三都橋花崗閃緑岩の分布域中にのみ産することから, 「三都橋花崗閃緑岩に密接に伴い産する苦鉄質岩類」として便宜的にここで扱う。

三都橋花崗閃緑岩に密接に伴われる苦鉄質岩類は, 中

粒-細粒の石英黒雲母含有角閃石斑れい岩である(第7図b, 第8図c)。細粒の角閃石斑れい岩は、「足助」図幅地域において三都橋花崗閃緑岩と液状態でミキシングした産状が報告されている(山崎, 2012), いわゆるMME (Mafic Magmatic/Microgranular Enclaves: Didier and Barbalin, 1991) に酷似する。本地域においては露頭の状況が悪く三都橋花崗閃緑岩との直接の関係は確認できなかったが、「足助」図幅地域と同様に相互に貫入あるいは包有しあう関係であるものと思われる。三都橋花崗閃緑岩に密接に伴って産する「足助」地域の苦鉄質岩類には粗-中粒のキュムレイト組織を示す斑れい岩も産するが、少なくともこの細粒苦鉄質岩についてはモード組成において、輝石を欠く点で後に述べる作手苦鉄質岩類と明瞭に区別される(第7図b)。

細粒の石英黒雲母含有角閃石斑れい岩は、完晶質で角閃石と斜長石の定向配列が顕著である(第10図d)。主として普通角閃石と斜長石から構成され、少量のイルメナイト、石英、黒雲母を含む。角閃石は半自形-他形・長柱状で、長径1.0 mmから0.5 mm程度のもが多いが、長径が2.0 mmに達する著しく伸長した結晶も産する。Y = Z = 帯緑褐色、X = 淡緑褐色の多色性を示し、コアの部分は多数の微細な不透明鉱物の粒状結晶の存在によって汚濁している。斜長石は半自形・長柱状で、長径0.5 mmから0.1 mm程度のもが多いが、長径2.0 mm程度の微斑晶状の結晶も多数認められる。結晶の大きさにかかわらず、一般に顕著な累帯構造を示す。黒雲母は他形・粒間充填状でY = Z = 赤褐色、X = 淡褐色の多色性を示す。石英も他形・粒間充填状で、プール状に散点的に産する。

4.3 作手苦鉄質岩類 (Mf)

作手苦鉄質岩類は、作手塩瀬南東に小規模に分布するものと、新城市横川及び椎平付近の2つの小岩体から主として構成される。いずれも中-細粒片麻状石英黒雲母含有輝石角閃石斑れい岩から構成される(第7図b)。見かけ上は石英閃緑岩質のものが多いが、後に述べるように斜長石のコアはAnが81-78程度を示すため(第1表)、領家深成岩類のトータル岩や花崗閃緑岩と明示的に区別し、本論では苦鉄質岩類として扱う。この作手苦鉄質岩類の位置づけについては後に議論する。一般に顕著な片麻状構造を示すが、片麻状構造の強弱はところによって異なる(第8図d, e)。片麻状構造と調和的な方向に伸長したレンズ状の暗色包有岩を含むことがある(第9図b)。新城トータル岩との直接の関係は明らかではないが、武節花崗岩には貫入されている(第9図c)。

作手苦鉄質岩類を構成する片麻状中-細粒石英黒雲母含有輝石角閃石斑れい岩は、完晶質で構成鉱物の粒径が3.5 mmから0.2 mm程度まで連続的に変化する組織を示す(第10図e)。主として斜長石、普通角閃石、黒雲母、斜方輝石、単斜輝石、石英及びイルメナイトから構成さ

れる。斜長石は自形-半自形、長柱状(長径3.5-0.2 mm)で、一般に顕著な累帯構造を示す。マントル部にリング状の汚濁帯を含むことがある。普通角閃石は半自形-他形で、長柱状(2.0-0.1 mm)で、単独で半自形結晶として産するほか、他形で黒雲母や輝石とモザイク状に入り組んで産する場合、輝石と斜長石の粒間を埋める場合がある。Y = Z = 褐色、X = 淡褐色の多色性を示す。黒雲母は半自形-他形(長径3.0-0.1 mm)・粒間充填状でY = Z = 黒褐色、X = 淡褐色の多色性を示す。斜方輝石は半自形-他形、長柱状(1.5-0.2 mm)で、Y = Z = 淡緑褐色、X = 淡褐色の弱い多色性を示す。単斜輝石は半自形-他形、単柱状-粒状で、一部普通角閃石化している場合がある(第10図e)。石英は他形・粒間充填状で、弱い波動消光を示す。

4.4 武節花崗岩 (Bg)

武節花崗岩は、新城市椎平西方及び滝川^{たきがわ}付近に小規模なレンズ状岩体として産するほか、地質図に表現できないスケールの岩脈として各所に産する。領家変成岩類及び作手苦鉄質岩類に貫入している(第9図c, d)。本地域に産する武節花崗岩は、細粒の白雲母黒雲母閃長花崗岩から構成される(第7図a)。モンゾ花崗岩を主体とする「御油」及び「足助」図幅地域に分布する武節花崗岩に比べ、本地域の武節花崗岩はややカリ長石に富む傾向が認められる。

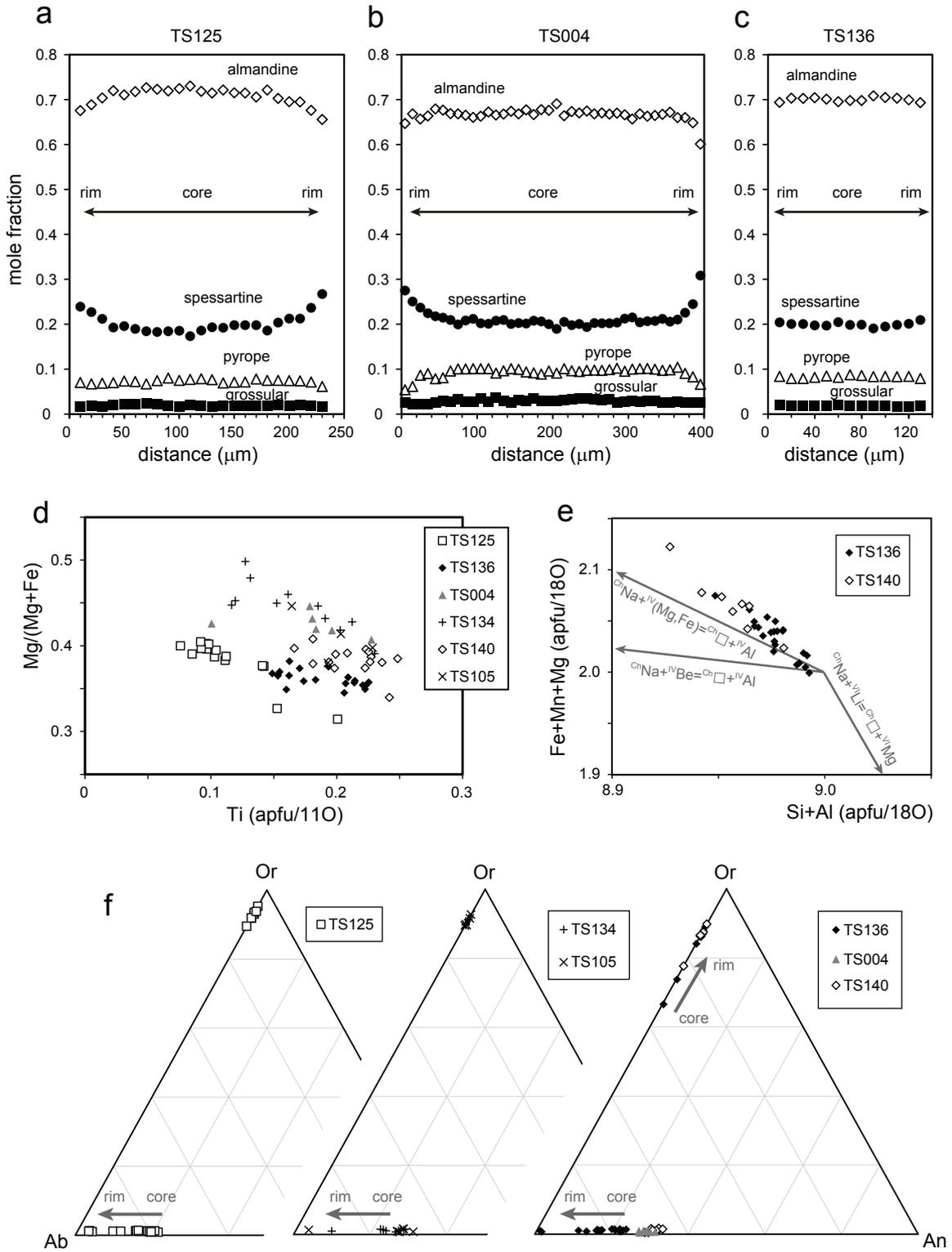
武節花崗岩は、完晶質で半自形粒状組織を示す(第10図f)。主としてカリ長石、石英、斜長石、白雲母及び黒雲母から構成され、少量のジルコン、アパタイト及び不透明鉱物を含む。カリ長石は他形・粒間充填状で、しばしばパーサイト構造を示す。石英は他形・粒間充填状-粒状で、弱い波動消光を示す。斜長石は半自形-自形、長柱状(長径1.5-0.5 mm)で、顕著な累帯構造を示す(第10図f)。白雲母は半自形、長径2.0-0.1 mm程度である。黒雲母は半自形-他形、長径1.5-0.5 mmで、Y = Z = 赤褐色、X = 淡褐色の多色性を示す。細粒・自形のアパタイトやジルコンをしばしば包有する。

5. 領家変成岩類の変成作用

5.1 地質温度圧力計による温度-圧力見積り

本地域の黒雲母帯からはざくろ石を含む変成泥岩が得られなかったが、西隣の「御油」地域において、ざくろ石-黒雲母地質温度計(Hodges and Spear, 1982)及びざくろ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計(Hoisch, 1990)を用いて見積もられた黒雲母帯の変成条件は506-593°C, 290-340 MPaである(Miyazaki, 2010)。

本地域のカリ長石堇青石帯のざくろ石を含む変成泥岩(TS125, TS004, TS136)に地質温度圧力計を適用し、変成作用の温度-圧力見積りを行った。これら試料は新城トータル岩及び三都橋花崗閃緑岩近傍の露頭から採集し



第11図 変成泥岩の鉱物化学組成. (a-c) ざくろ石の組成累帯構造. (d) 黒雲母の組成. (e) 堇青石の組成. (f) カリ長石及び斜長石の組成.

Fig. 11 Mineral chemistry of the Ryoke metapelitic rocks. (a-c) Zoning profiles of garnet. (d) Compositions of biotite. (e) Compositions of cordierite. (f) Compositions of K-feldspar and plagioclase plotted on the orthoclase (Or)-albite (Ab)-anorthite (An) ternary diagram.

第2表 変成泥岩のざくろ石, 黒雲母, 斜長石, 堇青石の化学組成.

Table 2 Compositions of garnet, biotite, plagioclase and cordierite in the Ryoke metapelitic rocks.

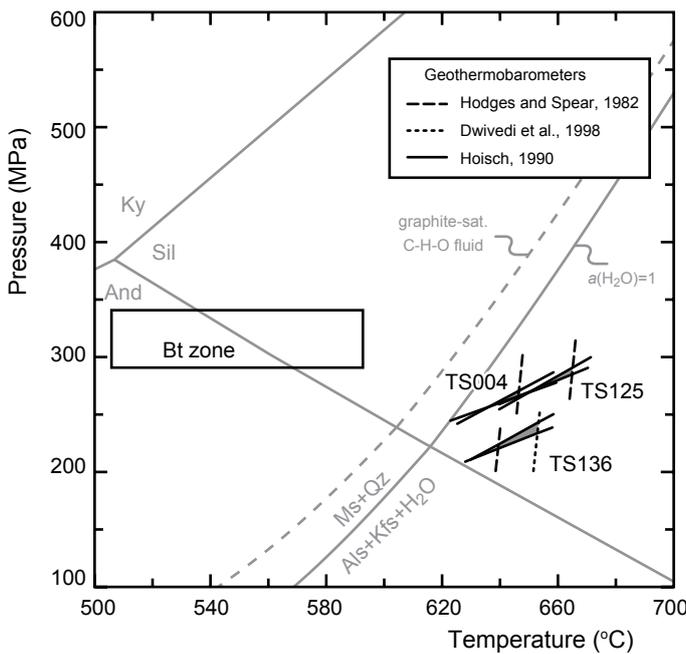
sample	TS125	TS125	TS136	TS004	TS004	TS125	TS136	TS004	TS125	TS136	TS004	TS136
mineral	Gr(t)	Gr(r)	Gr(t)	Gr(t)	Gr(r)	Bt	Bt	Bt	Pl	Pl	Pl	Crd
SiO ₂	36.39	36.02	36.51	36.60	36.46	33.70	34.21	33.81	62.49	62.21	60.85	47.22
TiO ₂	0.03	0.05	0.02	0.04	0.00	3.38	3.92	3.93	0.01	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	20.66	20.62	20.95	20.70	20.94	19.02	20.00	18.05	23.42	23.68	24.85	32.57
FeO*	32.71	29.34	32.08	30.92	27.45	21.11	20.68	21.20	0.02	0.03	0.01	10.89
MnO	8.50	11.79	9.02	9.30	13.90	0.60	0.37	0.76	0.03	0.00	0.00	0.93
MgO	1.89	1.53	2.12	2.53	1.69	5.43	6.45	8.16	0.00	0.00	0.01	6.33
CaO	0.68	0.59	0.65	1.08	0.91	0.00	0.03	0.00	4.22	4.44	5.96	0.01
Na ₂ O	0.01	0.00	0.02	0.02	0.01	0.08	0.12	0.10	9.05	8.79	7.67	0.22
K ₂ O	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	10.97	10.69	10.69	0.17	0.15	0.10	0.01
Total	100.87	99.95	101.38	101.19	101.36	94.30	96.47	96.69	99.41	99.31	99.46	98.19
O=	12	12	12	12	12	11	11	11	8	8	8	18
Si	2.96	2.96	2.95	2.96	2.95	2.66	2.62	2.60	2.78	2.77	2.71	4.95
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.23	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	1.98	2.00	2.00	1.97	2.00	1.77	1.80	1.64	1.23	1.24	1.30	4.03
Fe	2.23	2.02	2.17	2.09	1.86	1.39	1.32	1.36	0.00	0.00	0.00	0.96
Mn	0.59	0.82	0.62	0.64	0.95	0.04	0.02	0.05	0.00	0.00	0.00	0.08
Mg	0.23	0.19	0.26	0.30	0.20	0.64	0.73	0.94	0.00	0.00	0.00	0.99
Ca	0.06	0.05	0.06	0.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.20	0.21	0.28	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.78	0.76	0.66	0.05
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	1.04	1.05	0.01	0.01	0.01	0.00
Total	8.05	8.04	8.05	8.06	8.05	7.82	7.79	7.88	5.00	4.99	4.97	11.06
Alm	72	66	70	67	60	-	-	-	-	-	-	-
Sps	19	27	20	20	31	-	-	-	-	-	-	-
Prp	7.4	6.1	8.3	9.7	6.6	-	-	-	-	-	-	-
Grs	1.9	1.7	1.8	3.0	2.5	-	-	-	-	-	-	-
Mg#	9	9	11	13	10	31	36	41	-	-	-	51
An	-	-	-	-	-	-	-	-	20	22	30	-

*total Fe as FeO. c: core, r: rim.

たものである(第4図a)。後述するように、これら試料は接触変成作用の最高温度時にほぼ完全に再結晶したのち、様々な程度に後退変成作用を被っている。そのため、広域変成作用時の情報は読み取れないが、接触変成作用時の条件を見積もることができる。また、見積もられる圧力条件は接触変成作用を与えた新期領家花崗岩類の定置深度に換算できる。温度-圧力見積りに用いた鉱物のEPMA分析値を第2表に示す。

TS125は新城市只持小松に小規模に分布する三都橋花崗閃緑岩接触部の露頭から採集した泥質片麻岩である。ざくろ石は直径0.3 mm前後の自形結晶で、ダスト状包有物(主に石英と流体)を含むコアと包有物に乏しいリムが認識できる(第6図f)。ざくろ石の結晶はコアが組成的にほぼ均質であるが、リムでMnが増加する逆累帯構造を示す(第11図a)。このような特徴は最高温度時に拡

散により成長累帯構造が均質化したあと、降温期に周囲の鉱物(主に黒雲母)と元素交換反応が継続したことを意味する。したがってざくろ石を用いて昇温期の温度圧力条件を見積もることはできない。また、堇青石の分解物と考えられる白雲母-緑泥石集合体を含む。こうした降温期の再平衡により、基質の黒雲母はMg/(Mg + Fe)が上昇、Tiが減少するような組成変化を示し(第11図d)、最もTiO₂に富む組成が最高温度時を代表すると考えられる(Ikeda, 1991, 1998)。また、斜長石はリムに向かって単調にAn成分が減少する累帯構造をもち、コアの組成はAn₁₈₋₂₁である(第11図f)。均質なざくろ石のコア、TiO₂に富む黒雲母、斜長石のコアの組成を組み合わせ、ざくろ石-黒雲母地質温度計(Hodges and Spear, 1982)及びざくろ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計(Hoisch, 1990)を適用すると、温度-圧力条件は650-665°C, 270-290



第12図 領家変成岩類の温度-圧力見積り. ざくろ石-黒雲母地質温度計 (Hodges and Spear, 1982), ざくろ石-堇青石地質温度計 (Dwivedi *et al.*, 1998), ざくろ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計 (Hoisch, 1990) の適用結果を示す. 黒雲母帯の温度-圧力条件はMiyazaki (2010) による. Al_2SiO_5 相図及び白雲母+石英分解反応曲線はHolland and Powell (1998) の熱力学データセット (2002改訂) により計算した.

Fig. 12 Pressure-temperature estimates of the Ryoke metamorphic rocks from the Tsukude area using garnet-biotite geothermometer (Hodges and Spear, 1982), garnet-cordierite geothermometer (Dwivedi *et al.*, 1998) and garnet-biotite-plagioclase-quartz geobarometers (Hoisch, 1990).

MPaと見積られる (第12図).

TS004は新城トータル岩近傍の泥質片麻岩で、単純な鉱物組み合わせ (ざくろ石+黒雲母+斜長石+石英) をもつ。ざくろ石は直径0.4 mm前後の自形結晶をなし、コアが組成的に均質で、リムでMnが増加、Mgが減少する逆累帯構造を示す (第11図b)。また、斜長石の組成はAn27-31である (第11図f)。TS125と同様に地質温度圧力計を適用すると、650-665°C、270-290 MPaという条件が得られる (第12図)。

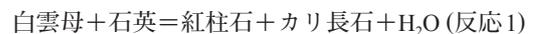
TS136は新城トータル岩小岩体近傍に産する泥質グラノフェルスで、例外的に後退変成作用の影響が小さいため温度-圧力見積りに適している。半自形ないし他形のざくろ石は黒雲母と接する部分を除いて組成的に均質である (第11図c)。堇青石は変質しておらず (第6図e)、その組成は $Mg/(Mg + Fe) = 0.505 \pm 0.016$ で、Bertoldi *et al.* (2004) の示した元素置換を考慮するとLiやBeを含まない一般的な堇青石と考えられる (第11図e)。また分析値のトータルが97-99 wt%とやや不足し、揮発性成分分子をチャンネル内に含むことを暗示する。粒間に存在する斜長石はリムに向かってAn成分が減少 (An17からAn1) する累帯構造を示す (第11図f)。圧力見積りにはカリ長石や堇青石に包有される組成的に均質な斜長石 (An20-24) を用いた。ざくろ石-黒雲母-斜長石-石英地質圧力計にざくろ石-黒雲母地質温度計を組み合わせると630-640°C、210-225 MPa、Berman (1990) のざくろ石の活動度モデルを組み込んだざくろ石-堇青石温度計 (Dwivedi *et al.*, 1998) を組み合わせると630-650°C、210-245 MPaと見積られる (第12図)。

以上の温度-圧力見積りはいずれも珪線石安定領域に

あり (第12図)、TS125及びTS136を含むカリ長石堇青石帯の変成泥岩中に珪線石が産すること (第4図b) と調和的である。

5.2 変成泥岩のシュードセクション解析

比較的単純な変成泥岩の相関係はKFMASH系などの反応曲線網でも解析可能であるが、実際に起こる反応は全岩組成に依存する。黒雲母帯の変成泥岩の鉱物共生は、全岩組成 (モル基準) がAKF図 ($A = Al_2O_3 - K_2O$, $K = K_2O$, $F = FeO + MgO$) の上で黒雲母-白雲母タイラインよりA頂点側にあるときは紅柱石が出現し、K頂点側にあるときはカリ長石が出現する。一方、より高温の接触変成帯では次の反応により白雲母が分解し、紅柱石+カリ長石共生が安定になる (第12図)。



三宅ほか (1992) は、「御油」地域の変成泥岩に含まれる紅柱石斑状変晶の微細組織を記載し、変形と紅柱石成長の時間的關係から広域変成作用と接触変成作用で形成された紅柱石が識別できることを示した。Adachi and Wallis (2008) は、三宅ほか (1992) が認識した紅柱石微細組織を、基質の片理を形成した変形 (D1変形) とその前の変形のあいだに成長したインターテクトニック (I) タイプ、D1終了後の接触変成時に静的に成長したポストテクトニック (P) タイプ、両者の複合 (C) タイプの三種に改めて分類・命名した。そして、全岩組成の違いにより広域変成作用時に成長を始めた紅柱石斑状変晶 (Iタイプ及びCタイプ)、及び接触変成時に反応1により生成した紅柱石斑状変晶 (Pタイプ) といった多様性が生じたことを示した。また、三宅ほか (1992) やAdachi and Wallis

第3表 変成泥岩及び標準岩石試料の全岩主要元素組成.

Table 3 Whole-rock major element compositions of metapelite and GSJ reference rock samples.

sample	TS125	TS134	JG-1a	JG-1a R.V.**
SiO ₂	67.31	61.91	72.09	72.30
TiO ₂	0.56	0.83	0.25	0.25
Al ₂ O ₃	16.10	19.47	14.15	14.30
Fe ₂ O ₃ *	5.66	5.09	2.00	2.00
MnO	0.26	0.07	0.06	0.06
MgO	1.52	1.95	0.72	0.69
CaO	0.69	1.11	2.18	2.13
Na ₂ O	2.19	2.01	3.39	3.39
K ₂ O	4.44	6.86	3.99	3.96
P ₂ O ₅	0.10	0.15	0.08	0.08
Total	98.83	99.44	98.92	99.16
LOI	2.38	2.82	-	-

*total Fe as Fe₂O₃. **Recommended values (Imai *et al.*, 1995).

(2008) は、紅柱石+カリ長石共生が安定な接触変成帯の外側の黒雲母帯に、IタイプのみならずCタイプの紅柱石も広く分布することから、新城トータル岩貫入にともなう熱的影響は非常に広範に及んでいたことを示唆した。

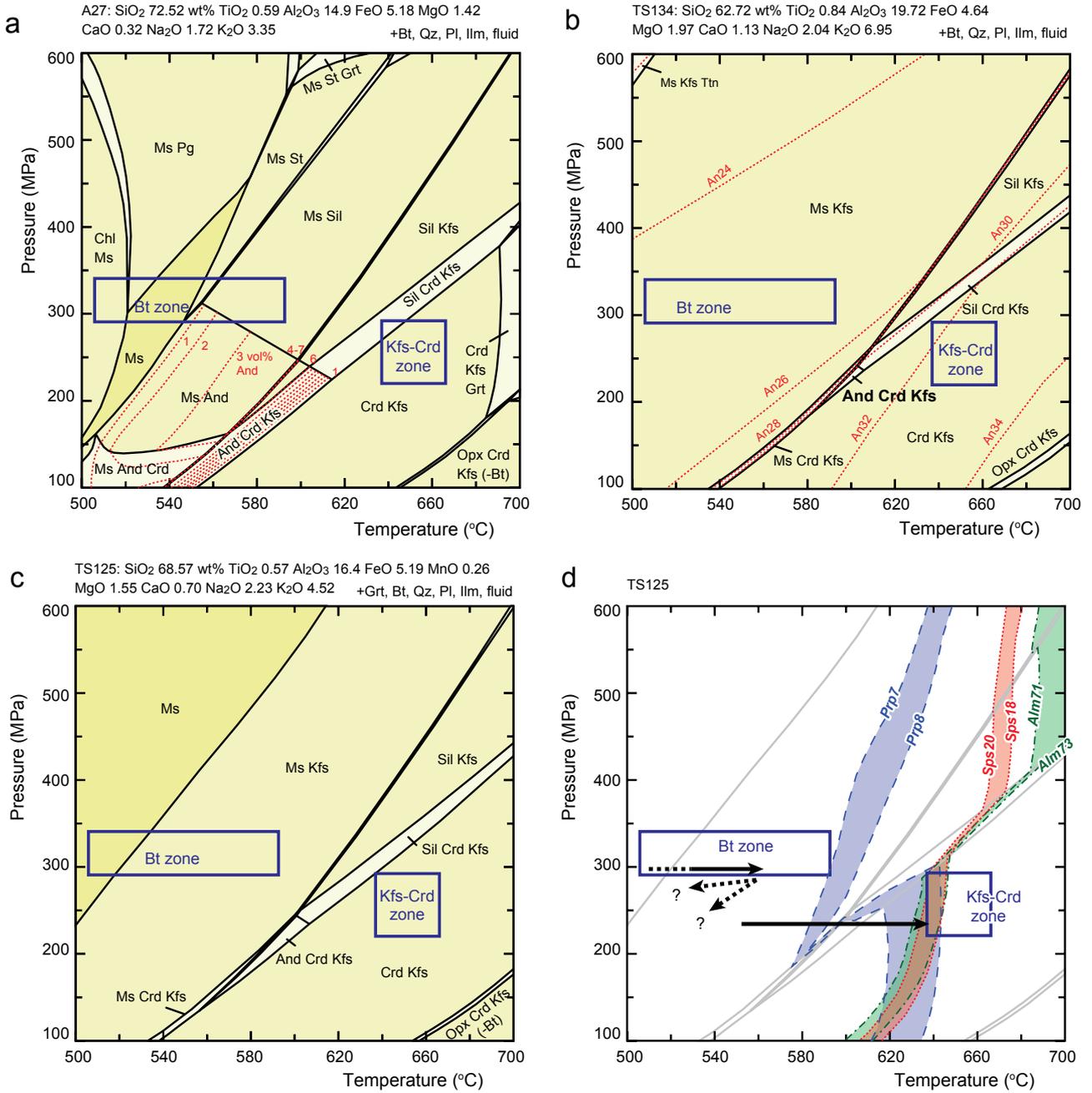
このような全岩組成の違いを反映した鉱物組合せや微細組織の多様性を理解するには、個々の岩石の全岩組成に対する相平衡図(シュードセクション)を用いた解析が有効である。本地域及びその西方延長である「御油」図幅地域の上部ユニットの変成作用を理解するため、三種類の代表的な変成泥岩のシュードセクション解析を行った。本地域の試料として、カリ長石堇青石帯の泥質片岩(TS134)及びざくろ石を含む泥質片麻岩(TS125)を選び、XRF全岩組成分析を行った(第3表)。また、白雲母-黒雲母タイラインよりもA頂点側にあるアルミナ質変成泥岩として、浅見ほか(1982)が記載した、「御油」地域黒雲母帯の十字石を含む泥質片岩(以下、A27と呼ぶ)の湿式全岩分析値も検討に加えた。

シュードセクションの計算はPerple_X_6.6.6.(Connolly, 2009)を用いたギブスエネルギー最小化法により行った。端成分の熱力学データはHolland and Powell(1998, 2002改訂)、活動度モデルは、ざくろ石、イルメナイト、黒雲母(White *et al.*, 2000)、白色雲母(Coggon and Holland, 2002)、緑泥石(Holland *et al.*, 1998)、長石(Fuhrman and Lindsley, 1988)、堇青石、斜方輝石、十字石(Holland and Powell, 1998)を用いた。御油-作手地域の領家変成岩類上部ユニットの変成泥岩には部分熔融組織(ミグマタイト)が認められないため、メルト相は考慮していない。全岩化学分析値をもとに、MnOに富みざくろ石を含むTS125は10成分のMnO-TiO₂-

Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O (Mn-Ti-NCKFMASH)、ざくろ石を含まないTS134やA27は9成分のTi-NCKFMASHをモデル系とした。また、TS125のざくろ石中に初生流体包有物がみられるため、流体は過剰相とした。本地域の変成泥岩は炭質物を普遍的に含むが、炭酸塩や磁鉄鉱は含まない。そのため、各温度-圧力での流体組成はグラファイトと平衡(2C + 2H₂O = CO₂ + CH₄)で、H₂Oのモル分率が最大となるように扱った(Ohmoto and Kerrick, 1977; Connolly and Cesare, 1993)。H₂O活動度が計算条件より低くなる可能性はいくつか考えられ、その場合脱水反応はより低温で起こる。しかし今回の場合、H₂O活動度に依存しない地質温度圧力計を用いて見積もられた温度-圧力条件とシュードセクション解析の結果は矛盾しない。

まず、アルミナ質変成泥岩(A27)のシュードセクション図(第13図a)において、Al₂SiO₅鉱物の安定領域は白雲母安定領域内にも広がっており、黒雲母帯にIタイプ紅柱石が産出することと調和的である。「御油」地域の黒雲母帯の条件(Miyazaki, 2010)とシュードセクション図から、Iタイプ紅柱石は300 MPa, 550°C程度の条件で形成されたと考えられる。また、Al₂SiO₅鉱物の安定領域の低温側に十字石の安定領域も出現し、Iタイプ紅柱石が十字石のレリックを包有する(浅見ほか, 1982)ことと整合的である。更に、第13図aには紅柱石の等モード線を示してあるが、白雲母安定領域内における紅柱石の生成は連続反応である。そのため接触変成作用に伴う温度上昇が僅かでも紅柱石が新たに成長し、Cタイプ斑状変晶が黒雲母帯に広く産出することを説明できる。

続いて、TS134はカリ長石堇青石アイソグラッド付近



第13図 変成泥岩のシュードセクション図。黒雲母帯及びカリ長石堇青石帯の温度圧力条件(第12図)も示した。(a) 十字石及びIタイプ紅柱石を含む黒雲母帯の泥質片岩(A27: 浅見ほか, 1982)。赤点線は紅柱石の等モード線(vol%)。(b) カリ長石堇青石アイソグラッド近傍のPタイプ紅柱石を含む泥質片岩(TS134)。赤点線は斜長石のAn値。(c) カリ長石堇青石帯のざくろ石を含む泥質片麻岩(TS125)。(d) TS125のざくろ石コア組成のアイソプレッス及び推定される温度-圧力経路。And, 紅柱石, Bt, 黒雲母, Chl, 緑泥石, Crd, 堇青石, Grt, ざくろ石, Ilm, イルメナイト, Kfs, カリ長石, Ms, 白雲母, Pg, パラゴナイト, Pl, 斜長石, Qz, 石英, Sil, 珪線石, St, 十字石。

Fig. 13 P-T pseudosection diagrams of the Ryoke metapelitic rocks with P-T conditions of the biotite and K-feldspar-cordierite zones (Fig. 12). (a) Staurolite- and I-type andalusite-bearing schist (A27: originally described in Asami *et al.*, 1982) from the biotite zone. Isomodes of andalusite are indicated by red dotted lines. (b) P-type andalusite-bearing schist from the incipient K-feldspar-cordierite zone (TS134). Anorthite contents in plagioclase are indicated by red dotted lines. (c) Garnet-bearing gneiss from the K-feldspar-cordierite zone (TS125). (d) Isoleths for actual garnet core compositions in TS125. Inferred P-T path of rocks in the K-feldspar-cordierite zone is indicated by black arrows. And: andalusite, Bt: biotite, Chl: chlorite, Crd: cordierite, Grt: garnet, Ilm: ilmenite, Kfs: K-feldspar, Ms: muscovite, Pg: paragonite, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Sil: sillimanite, St: staurolite.

の泥質片岩で、Pタイプの紅柱石を含む(第6図b)。そのシュードセクション図においても反応1が紅柱石の初出線となっていることがわかる(第13図b)。また、この試料の鉱物組み合わせ(紅柱石+堇青石+カリ長石)の安定領域は200–250 MPa, 590–610°Cに現れており(第13図b)、この条件で予測される斜長石の組成は An_{30} である。実際の斜長石は後退変成作用時にマーグライトの形成などに伴い An の低下が起こっているが、分析点のなかで最高値 An_{28} (第11図f)は予測された組成に近い。カリ長石堇青石帯のより高温域では、次の紅柱石分解反応が起こる。

紅柱石=珪線石(反応2)

紅柱石/珪線石+黒雲母+石英=堇青石+カリ長石+ H_2O (反応3)

実際に、カリ長石堇青石アイソグラッドより新城トータル岩に近づくと変成泥岩中に紅柱石はみられなくなり、また堇青石中に珪線石包有物が観察される。こうした変化から、新城トータル岩周囲の接触変成帯は230–240 MPa程度の圧力条件での累進的温度上昇を記録していると考えられる。

MnOに富む泥質片麻岩(TS125)のシュードセクション図(第13図c)では、計算した温度-圧力範囲の全域でざくろ石が安定であるが、それ以外の鉱物組み合わせの安定領域はTS134とほぼ同じである。前述のとおり、この試料は接触変成作用の最高温度時にほぼ完全に再平衡したと考えられるため、主要構成鉱物内には広域変成作用時の情報を残していない。そのため、ざくろ石コアの組成を用いて接触変成作用ピーク時の温度-圧力見積りを行うことができる。シュードセクションのような相平衡図は任意の温度-圧力条件で鉱物組み合わせ、及び各鉱物の組成と量比が一意的に決まる。変成泥岩のざくろ石は一般的に4つの端成分(Fe, Mn, Mg, Ca)からなる。グロシユラー(Gr: $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$)成分に乏しいので、アルマンディン(Alm: $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$)、パイロープ(Prp: $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$)、スペサルティン(Sps: $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$)を独立成分に選び、TS125の実際のざくろ石コアの組成($Alm_{71-73}Sps_{18-20}Prp_{7-8}Gr_{2}$: 第11図a)が再現される条件を示した(第13図d)。三つの組成アイソプレスは堇青石+カリ長石+ざくろ石安定領域において620–640°C, 100–300 MPaの範囲内で交差する。交点付近で三つの組成アイソプレスがいずれも温度依存性の高い曲線となっているため、圧力の誤差が大きいが、実際に観察される鉱物組み合わせや地質温度圧力計による温度-圧力見積りと整合的である。また、この試料がリック状の紅柱石やフィプロライトを少量含むことを考慮すると、230–240 MPa程度の圧力条件で等圧温度上昇を経験したと考えられる。

以上の地質温度圧力計及びシュードセクションを用いた解析結果から、本地域のカリ長石堇青石帯の岩石は、

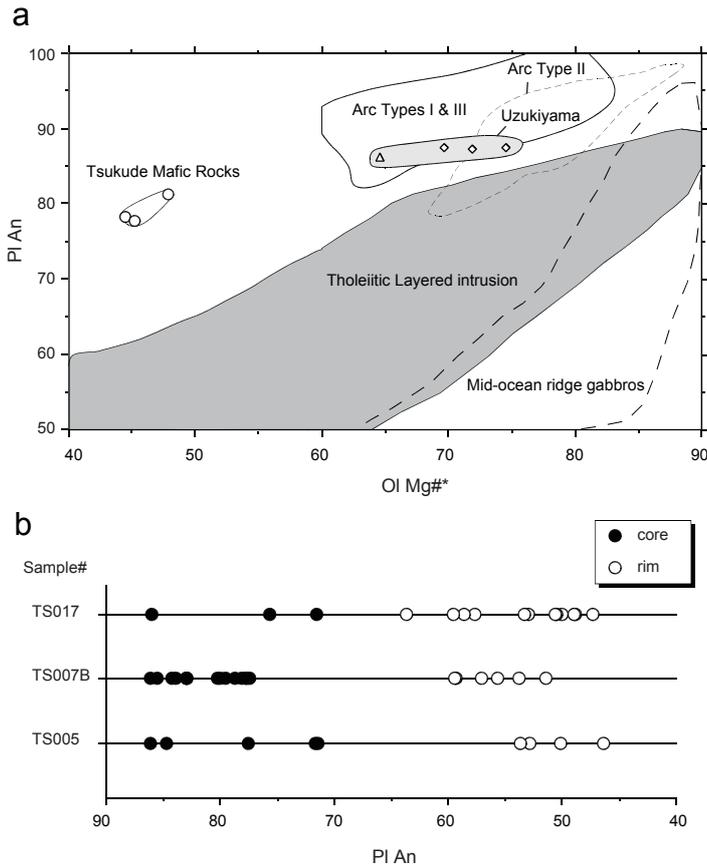
広域変成作用の後に230–240 MPa程度(上載岩石の密度を $2,700 \text{ kg/m}^3$ とすると、深度8.5–9.0 km)の圧力条件まで減圧したところで、新城トータル岩や三都橋花崗閃緑岩の貫入・定置による等圧温度上昇を経験したと考えられる。またこの圧力条件下で、カリ長石堇青石アイソグラッドはおよそ600°Cの等温線に相当する。三都橋花崗閃緑岩の主岩体周囲の接触変成帯について、本地域では検討していないが、「足助」図幅地域に珪線石+カリ長石+堇青石共生が産すること(山崎, 2012)を考慮すると、ほぼ同じ定置深度であったと考えられる。また今回は検討しなかったが、作手苦鉄質岩類近傍の粗粒な片麻岩は新城トータル岩の接触変成作用との重複により、複雑な熱史を経ている可能性がある。

5.3 接触変成帯の幅とテクトニクスへの意義

既に新城トータル岩の南西側貫入面において指摘されてきたことであるが、新城トータル岩周囲の接触変成帯は異常に幅広い(三宅ほか, 1992; Adachi and Wallis, 2008; 宮崎, 2008)(第3図)。本調査において、新城トータル岩の北側貫入面の接触変成帯の見かけ幅も非常に広いことが明らかになった(第4図)。一方、新城トータル岩(86.0 ± 4.7 – 85.2 ± 3.3 Ma: Morishita and Suzuki, 1995)より僅かに後に貫入した三都橋花崗閃緑岩(83.8 ± 1.3 – 84.1 ± 3.1 Ma: Suzuki *et al.*, 1994a, 鈴木ほか, 1994b)は、貫入岩体の規模に対しての接触変成帯の幅が特に広いということはない。但し、本地域の三都橋花崗閃緑岩は主に変成砂岩に貫入しているため、接触変成帯の幅を正確には決められていない。

新城トータル岩周囲に幅広い接触変成帯が形成された要因として、その貫入時(約86 Ma)に母岩の初期温度が異常に高かった可能性が指摘されている(Adachi and Wallis, 2008)。そのような異常な高地温勾配は、ほぼ同じ定置深度をもつと考えられる三都橋花崗閃緑岩の貫入時(約84 Ma)には解消していたことを示唆する。領家変成岩類の高温低圧型の広域変成作用(約100 Ma以降: Suzuki and Adachi, 1998)の継続期間は十分明らかになっていないが、5–10 Myr程度と推定されている(Suzuki *et al.*, 1994a; Miyazaki, 2010; Kawakami *et al.*, 2012)。そのため、広域変成作用終了後、新城トータル岩貫入時の高地温勾配は、先行するマグマ活動の存在を示唆しているのかもしれないが、より大規模なテクトニクスに関係している可能性もある。Aoya *et al.* (2009)は85 Ma前後の海嶺沈み込みにより、前弧域マンツルの蛇紋岩の脱水分解及び下部地殻苦鉄質岩の加水溶融が起こり、新时期領家花崗岩マグマが生成したとするモデルを提案している。沈み込んだ海嶺軸の通過により前弧域の温度構造は大きく変わり、短期的に異常な高地温勾配条件をつくりだす可能性がある。

本地域の領家深成岩類周囲に発達する接触変成帯の幅



第14図 作手苦鉄質岩類の斜長石Anとかんらん石Mg# (Ol Mg#*) の変化図. 様々な地域の斑れい岩類のAn-Fo関係と直接比較するため, 斜方輝石のMg#はBeattie *et al.* (1991) のFe/Mg分配係数を用いてかんらん石のFoに変換している. 卯月山苦鉄質複合岩体の斑れい岩類及び様々な斑れい岩の領域はそれぞれ, 山崎ほか (2012) 及びBeard (1986) による.

Fig. 14 Plagioclase An vs. olivine Mg#* covariation plots of constituent minerals of gabbroic rocks from the Tsukude mafic rocks. Ol Mg#* and An denote $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})$ and $100 \times \text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na})$, respectively. Opx Mg#s from the Tsukude mafic rocks and Uzukiyama mafic plutonic complex were conventionally converted to Ol Mg#s using Fe/Mg exchange coefficient (Beattie *et al.*, 1991). Data of the Uzukiyama mafic plutonic complex and fields of various gabbros are from Yamasaki *et al.* (2012) and Beard (1986), respectively.

は, テクトニックモデルの検証において重要と考えられる. そのため今後, 炭質物のラマンスペクトルを用いた迅速簡便な地質温度計により本地域の接触変成帯の範囲及び温度構造を精密化する必要がある. また, 広域変成作用と接触変成作用のあいだの地温勾配の時間変化を定量的に明らかにする必要がある. その手段として成長累帯構造を保存したざくろ石を用いて温度-圧力経路の導出を行うことが有効と考えられる.

6. 作手苦鉄質岩類の位置づけと火成作用

6.1 位置づけ

作手苦鉄質岩類は, 仲井 (1970) において「清崎岩体」構成岩相の一部である中粒角閃石-黒雲母花崗閃緑岩-石英閃緑岩として地質図に示されている. この「清崎岩体」は, 新城トータル岩体と清崎花崗閃緑岩体 (Kutsukake, 2001) を一括した名称で, 新城トータル岩体に対して固有の岩体名が与えられた後は, 10 km程北方を模式地とする清崎花崗閃緑岩体に対比される岩型として取り扱われたり (例えば, 牧本ほか2004), あるいは清崎花崗閃緑岩体を含む, いわゆる「新期花崗岩類」の一部として取り扱われたりしている (例えば, Kutsukake, 2000, Kutsukake *et al.*, 2003). 作手苦鉄質岩類は, 既に記載したように, 石英や黒雲母を比較的多く

含む点で見かけ上, 石英閃緑岩質であるものの, 斜方輝石, 単斜輝石及び普通角閃石を普遍的に含む点からは, 領家深成岩類のトータル岩, 花崗閃緑岩や花崗岩とは明らかに異なる鉱物組み合わせを示す. また, 清崎花崗閃緑岩はカリ長石を普遍的に含む花崗閃緑岩質であること, 特に長径2 cm以上に達するカリ長石斑晶をしばしば含むこと (Kutsukake, 2001) から, 作手苦鉄質岩類の記載的特徴とは大きく異なる. 更に, Kutsukake (2002) によると, 清崎花崗閃緑岩を構成する斜長石の組成は An_{45-32} 程度で, 後に述べる作手苦鉄質岩類のそれ (An_{81-78} ; 第1表) とは明らかに異なる. 一方, 領家帯に産する苦鉄質岩類は, 周辺の「御油」及び「足助」図幅地域に限っても斜方輝石含有黒雲母角閃石斑れい岩, 輝石角閃石斑れい岩, 斜長石含有角閃石岩, 角閃石斑れい岩及び角閃石黒雲母斑れい岩-石英閃緑岩と多様な岩相を示すこと (西岡, 2008; 山崎, 2012) から, 優黒質で輝石類を含むという点で作手苦鉄質岩類と共通の特徴を示す. そこで, 作手苦鉄質岩類については, 清崎花崗閃緑岩の一部ではなく, 苦鉄質岩類として独立に扱うことが妥当であると考えられる.

作手苦鉄質岩類の貫入時期, すなわち領家深成岩類における位置づけについては, 本調査で確認された貫入関係からは武節花崗岩の活動以前であるといえる. その分布位置や岩相からは「御油」図幅地域の作手岩波を中心とする地域に分布する苦鉄質岩類 (西岡, 2008) と

の成因的關係が示唆されるが、Nakajima *et al.* (2004) による同苦鉄質岩類からのジルコンのU-Pb SHRIMP年代は 72.4 ± 1.2 Maであり、武節花崗岩よりも若い。したがって、作手苦鉄質岩類は、三都橋花崗閃緑岩 (CHIME年代, 84.1 ± 3.1 Ma- 83.8 ± 1.3 Ma; 鈴木ほか, 1994b) に密接に伴って産する苦鉄質岩類もしくは、新城トータル岩 (CHIME年代, 86.0 ± 4.7 - 85.2 ± 3.3 Ma; Morishita and Suzuki, 1995) 中に普遍的に含まれる暗色包有岩と同源である可能性がある。後者は、新城トータル岩と同時期に活動した産状は報告されていないが、1) 三都橋花崗閃緑岩においても苦鉄質岩類は暗色包有物として産することも多いこと、2) 新城トータル岩と三都橋花崗閃緑岩は活動時期 (CHIME年代) が近接しており、一部は誤差の範囲で重なることから、86 Maもしくはそれ以前から、作手-御油地域において苦鉄質マグマ活動が生じていた可能性もある。一方、既に述べたように「御油」図幅地域の作手岩波地域周辺の苦鉄質岩類は岩相変化に富むことから、近接した地域に産しながらも、すべてが同時期の活動の産物ではない可能性も否定できない。苦鉄質岩類と花崗岩類との成因的關係や領家帯の火成-変成作用を総括的かつより具体的に理解するためには、作手苦鉄質岩類やその他の苦鉄質岩類の固結年代を知ることが今後の課題である。

6.2 火成作用

作手苦鉄質岩類をもたらした親マグマの性質を知るため、斜方輝石と斜長石の鉱物化学組成を予察的に検討した。マグマと平衡共存するかんらん石もしくは斜方輝石と斜長石の組成關係は、マグマの組成、圧力、含水量などによって変化し、分化の進行にともなって、結果的にそれらのパラメーターの違いを反映した異なる分化曲線として示される。この組成關係を知るためには、斜方輝石 (もしくはかんらん石) と斜長石がともにマグマから晶出していたことが前提となるが、山崎ほか (2012) で指摘したように、これまでの領家帯の苦鉄質深成岩類の検討においては、晶出關係が必ずしも十分に吟味されていないか、あるいは吟味されていても比較のために十分なデータが示されていない。そこで、ここではそれらを十分に検討した長野県飯田市の卯月山苦鉄質複合岩体のデータ (山崎ほか, 2012) を比較のために示す。

作手苦鉄質岩類の斜方輝石と斜長石の組成關係は、斜方輝石のMg# [= $100 \times \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ in atomic ratio] が49-46であるのに対して斜長石のコアのAn組成が81-78と非常に高い (第14図a)。このような組成關係は、ソレライト質の層状分化岩体や中央海嶺 (海洋底) の斑れい岩のような、無水・低圧でのソレライト質マグマの分化では導くことができない (第14図a)。一方、第14図aに示されるように、作手苦鉄質岩類の斜方輝石と斜長石の組成關係は、マフィック鉱物のMg#が大きく離

れているものの、卯月山苦鉄質岩類やBeard (1986) による島弧タイプI & IIIの組成領域の延長上に位置しており、マフィック鉱物のMg#の低下、すなわちマグマの分化に伴って斜長石のAn組成が高いままに維持される共通の特徴を示す。このことは、作手苦鉄質岩類は、分化の段階は大きく異なるものの、基本的には卯月山苦鉄質複合岩体をもたらした親マグマと類似した組成の、含水・カルシウムアルカリ質のマグマから結晶化したことを示しているものと思われる。

作手苦鉄質岩類は、斜長石のコアのAn組成が81-78と、明らかに斑れい岩質な鉱物化学組成上の特徴を持っているにもかかわらず、石英や黒雲母を普遍的に含むという、広義の花崗岩類の記載の特徴も示し、また、このことがこの岩体がこれまで苦鉄質岩類として認識されてこなかった要因でもある。作手苦鉄質岩類の斜長石のAn組成をコアとリムに分けて観察すると、両者の間にはAn組成にギャップが認められる (第14図b)。深成岩類においては、すべての結晶の晶出開始時期や結晶化完了時期が必ずしも同時期ではなく、また薄片上で平面的に観察されるコアが三次元的なコアの位置であるとは限らないため、その組成はコアからリムにかけて連続するのが普通である。したがって、コアとリムとの間に、例えば検討試料TS005やTS007Bにみられるような明瞭な組成ギャップが存在するという事は、マントル部分を境に大きな組成ギャップがあることを示唆している。また、作手苦鉄質岩類中の斜長石のマントル部に認められるリング状の汚濁帯は、マグマ・ミキシングが生じた際に残される典型的な組織の一つである (例えば、Hibbard, 1981, 1995)。これらのことから、作手苦鉄質岩類は、固結段階の後期に周囲の変成岩類・花崗岩類の同化作用あるいは花崗岩質マグマとの混合によって大きく組成が変化し、その際に石英や黒雲母が生じた可能性がある。

7. まとめ

今回行った領家深成-変成コンプレックスの野外地質調査及び岩石学的検討の結果は以下のように要約できる。

- 1) 本地域の領家変成岩類の層厚は、見かけ上位の層厚約1,000 mに変成砂岩が卓越し、その下位層厚約3,000 mは変成泥岩を主体に連続性の良い変成珪質岩を挟む。大局的には北傾斜の単斜構造を示すが、西部において東西走向の軸面をもつシンフォーム・アンチフォームの繰り返しがみられる。
- 2) 本地域の領家変成岩類の層準は西隣の「御油」地域の上部ユニットに対比され、広域変成作用時 (約100 Ma) の変成度は黒雲母帯に相当すると考えられる。
- 3) 本地域の領家変成岩類に非調和に貫入する領家深成岩類周囲に接触変成帯 (カリ長石堇青石帯) が発達している。特に新城トータル岩周囲のカリ長石堇青石

帯は、見かけ幅が4 km以上に及び、その貫入時(約86 Ma)に母岩が高温状態にあったと考えられる。カリ長石堇青石アイソグラッドより高温側の岩石は、 $>600^{\circ}\text{C}$ 、230–240 MPaの温度-圧力条件で再結晶しており、新城トータル岩や三都橋花崗閃緑岩の定置深度は8.5–9.0 kmと見積もられる。

- 4) 作手地域及び「御油」地域上部ユニットの領家変成岩類は低圧高温型の広域変成作用に接触変成作用が重複している。「御油」地域における十字石の存在や紅柱石微細組織の多様性は全岩組成の変化により説明でき、より複雑な変成履歴や中圧型の変成段階を考える必要はない。
- 5) 本地域東部に分布する深成岩類(作手苦鉄質岩類)は石英や黒雲母に富む点から従来は花崗岩類として扱われていたが、斜方輝石及び単斜輝石を含み、斜長石のコアがCaに富む(An_{78-81})ことから、苦鉄質マグマから結晶化したものであり、中部地方領家帯に産する苦鉄質岩類と共通の岩石学的特徴を示す。

謝辞：地質情報研究部門の御子柴真澄氏にはXRF分析及びガラスビード作成、古川竜太氏には粉末岩石試料作成、地質標本館の坂野靖行氏にはEPMA分析に際し、お世話になった。地質情報研究部門の宮崎一博氏には原稿を読んでいただき、有益な助言をいただいた。副編集長の佐脇貴幸氏には原稿の不備をご指摘いただいた。以上の方々に感謝申し上げる。

文 献

- Adachi, Y. and Wallis, S. (2008) Ductile deformation and development of andalusite microstructures in the Hongusan area: constraints on the metamorphism and tectonics of the Ryoke Belt. *Island Arc*, **17**, 41–56.
- Aoya, M., Mizukami, T., Uehara, S.I. and Wallis, S.R. (2009) High-P metamorphism, pattern of induced flow in the mantle wedge, and the link with plutonism in paired metamorphic belts. *Terra Nova*, **21**, 67–73.
- 浅見正雄・星野光雄・宮川邦彦・諏訪兼位 (1982) 幡豆-本宮山地域の領家変成帯における十字石片岩の形成条件. *地質雑*, **88**, 437–450.
- 渥美博行 (1984) 愛知県寒狭川地域の領家変成岩から見出されたマーグライト. *地質雑*, **90**, 505–508.
- Beard, J.-S. (1986) Characteristic mineralogy of arc-related cumulate gabbros: Implications for the tectonic setting of gabbroic plutons and for andesite genesis. *Geology*, **14**, 848–851.
- Beattie, P., Ford, C. and Russel, D. (1991) Partition coefficients for olivine-melt and orthopyroxene-melt systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **109**, 212–224.
- Bence, A. E. and Albee, A. L. (1968) Empirical correction factors for the electron probe microanalysis of silicates and oxides. *Jour. Geol.*, **76**, 382–403.
- Berman, R.G. (1990) Mixing properties of Ca-Mg-Fe-Mn garnets. *Amer. Mineral.*, **75**, 328–344.
- Bertoldi, C., Proyer, A., Garbe-Schönberg, D., Behrens, H., Dachs, E. (2004) Comprehensive chemical analyses of natural cordierites: implications for exchange mechanism. *Lithos*, **78**, 389–409.
- Brown, M. (2010) Paired metamorphic belts revisited. *Gondwana Research*, **18**, 46–59.
- Coggon, R. and Holland, T.J.B. (2002) Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *Jour. Metam. Geol.*, **20**, 683–696.
- Connolly, J.A.D. (2009) Geodynamic equation of state: What and how. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **10**, Q10014.
- Connolly, J.A.D. and Cesare, B. (1993) C-O-H-S fluid composition and oxygen fugacity in graphitic metapelites. *Jour. Metam. Geol.*, **11**, 379–388.
- Didier, J. and Barbarin, B. (1991) The different types of enclaves in granites-Nomenclature. In Didier, J. and Barbarin, B., eds., *Enclaves and Granite Petrology*. Elsevier, Amsterdam, 19–23.
- Dwivedi, S.B., Mohan, A. and Lal, R.K. (1998) Recalibration of the Fe-Mg exchange reaction between garnet and cordierite as a thermometer. *Eur. Jour. Mineral.*, **10**, 281–289.
- Fuhrman, M.L. and Lindsley, D.H. (1988) Ternary-feldspar modeling and thermometry. *Amer. Mineral.*, **73**, 201–215.
- Hibbard, M. J. (1981) The magma mixing origin of mantled feldspars. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **76**, 158–170.
- Hibbard, M. J. (1995) *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall, New Jersey, 587p.
- Hodges, K.V. and Spear, F.S. (1982) Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 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.
- Holland, T.J.B. and Powell, R. (1998) An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Jour. Metam. Geol.*, **16**, 309–343.
- Holland, T.J.B., Baker, J. and Powell, R. (1998) Mixing properties and activity-composition relationships of chlorites in the system $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Eur. Jour. Mineral.*, **10**, 395–406.
- Ikeda, T. (1991) Heterogeneous biotite from Ryoke metamorphic rocks in the Yanai district, southwest Japan.

- Jour. Geol. Soc. Japan*, **97**, 537-547.
- Ikeda, T. (1998) Progressive sequence of reactions of the Ryoke metamorphism in the Yanai district, southwest Japan: the formation of cordierite. *Jour. Metam. Geol.*, **16**, 39-52.
- 池田芳雄・宇井啓高・菅谷義之 (1974) 愛知県新城市の中央構造線の新露頭. 地質雑, **80**, 195-196.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. (1995) 1994 compilation values for GSJ reference samples, "Igneous rock series". *Geochem. Jour.*, **29**, 91-95.
- Kato, Y. (1962) On the structural development of the Shidara basin. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **10**, 51-69.
- Kawakami, T. and Suzuki, K. (2011) CHIME monazite dating as a tool to detect polymetamorphism in high-temperature metamorphic terrane: Example from the Aoyama area, Ryoke metamorphic belt, Southwest Japan. *Island Arc*, **20**, 439-453.
- Kawakami, T. Yamaguchi, I., Miyake, A., Shibata, T., Maki, K., Yokoyama, T. D. and Hirata, T. (2012) Behavior of zircon in the upper-amphibolite to granulite facies schist/migmatite transition, Ryoke metamorphic belt, SW Japan: constraints from the melt inclusions in zircon. *Contrib. Mineral. Petrol.*,
- Kutsukake, T. (2000) Petrographic features of the gabbroic rocks in the Ryoke Belt of the Mikawa district, southwest Japan. *Sci. Rep. Toyohashi Mus. Nat. Hist.*, **10**, 1-12.
- Kutsukake, T. (2001) Geochemistry of the Kiyosaki Granodiorite in the Ryoke Belt, central Japan. *Sci. Rep. Toyohashi Mus. Nat. Hist.*, **11**, 1-12.
- Kutsukake, T. (2002) Mineral chemistry of the Kiyosaki Granodiorite in the Ryoke Belt, central Japan., *Mem. Comm. Res. Inst. Aichi Univ.*, **47**, 75-79.
- Kutsukake, T., Miyake, A. and Ohtomo, Y. (2003) Ryoke granitoids and metamorphic rocks in the eastern Mikawa district, central Japan. *Geol. Surv. Japan, Interim-Report*, **28**, 103-114.
- Le Maitre, W. D. (ed.)(2002) *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, 236 p.
- 牧本 博・山田直利・水野清秀・高田 亮・駒沢正夫・須藤定久 (2004) 20万分の1地質図幅「豊橋及び伊良湖岬」. 産総研地質調査総合センター
- 三宅 明・村田恵理・森下 修 (1992) 愛知県額田地域の領家変成岩中の紅柱石の成長時期. 岩鉱, **87**, 475-480.
- Miyashiro, A. (1972) Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. *Amer. Jour. Sci.*, **272**, 629-656.
- 宮崎一博 (2008) 御油地域の地質, 第4章 領家変成コンプレックス及び領家深成岩による接触変成域. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅). 産総研地質調査総合センター, p.18-40.
- Miyazaki, K. (2010) Development of migmatites and the role of viscous segregation in high-T metamorphic complexes: Example from the Ryoke Metamorphic Complex, Mikawa Plateau, Central Japan. *Lithos*, **116**, 287-299.
- Morishita, T. and Suzuki, K. (1995) CHIME ages of monazite from the Shinshiro Tonalite of the Ryoke belt in the Mikawa area, Aichi Prefecture. *Jour. Earth Planet. Sci., Nagoya Univ.*, **42**, 45-53.
- 仲井 豊 (1970) 愛知県三河地方の花崗岩類. 地球化学, **24**, 139-145.
- Nakai, Y. and Suzuki, K. (2003) Post-tectonic two-mica granite in the Okazaki area, central Japan: a field guide for the 2003 Hutton Symposium. *Geol. Surv. Japan, Interim-Report*, **28**, 115-124.
- Nakajima, T. (1994) The Ryoke plutonometamorphic belt: crustal section of the Cretaceous Eurasian continental margin. *Lithos*, **33**, 51-66.
- Nakajima, T., Kamiyama, H., Williams, I.S. and Tani, K. (2004) Mafic rocks from the Ryoke Belt, southwest Japan: implications for Cretaceous Ryoke/San-yo granitic magma genesis. *Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, **95**, 249-263.
- 西岡芳晴 (2008) 御油地域の地質, 第5章 領家深成岩. 地域地質研究報告 (5万分の1地質図幅). 産総研地質調査総合センター, p. 41-53.
- 大友幸子 (1985) 新城トータル岩体の累帯構造について. *MAGMA*, **73**, 69-73.
- Ohmoto, H. and Kerrick, D.M. (1977) Devolatilization equilibria in graphitic system. *Amer. Jour. Sci.*, **277**, 1013-1044.
- Okudaira, T., Hara, I., Sakurai, Y. and Hayasaka, Y. (1993) Tectono-metamorphic processes of the Ryoke belt in the Iwakuni-Yanai district, southwest Japan. *Mem. Geol. Soc. Japan*, **42**, 91-120.
- Okudaira, T., Beppu, Y., Yano, R., Tsuyama, M. and Ishii, K. (2009) Mid-crustal horizontal shear zone in the forearc region of the mid-Cretaceous SW Japan arc, inferred from strain analysis of rocks within the Ryoke metamorphic belt. *Jour. Asian Earth Sci.*, **35**, 34-44.
- Seo, T. and Hara, I. (1980) The development of schistosity in biotite schists from southwestern part of Mikawa Plateau, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **86**, 817-826.
- Suzuki, K. and Adachi, M. (1991) Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite

- and xenotime. *Geochem. Jour.*, **25**, 357–376.
- Suzuki, K. and Adachi, M. (1998) Denudation history of the high T/P Ryoke metamorphic belt, southwest Japan: constraints from CHIME monazite ages of gneisses and granitoids. *Jour. Metam. Geol.*, **16**, 23–37.
- Suzuki, K., Adachi, M. and Kajizuka, I. (1994a) Electron microprobe observations of Pb diffusion in metamorphosed detrital monazites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **128**, 391–405.
- 鈴木和博・森下泰成・梶塚 泉(1994b) 三河-東濃地域の領家変成岩と花崗岩のCHIMEモナザイト年代. 名古屋大学古川総合研究資料館報告, **10**, 17–38.
- Wallis, S.R., Anczkiewicz, R., Endo, S., Aoya, M., Platt, J.P., Thirlwall, M. and Hirata, T. (2009) Plate movements, ductile deformation and geochronology of the Sanbagawa belt, SW Japan: tectonic significance of 89–88 Ma Lu–Hf eclogite ages. *Jour. Metam. Geol.*, **27**, 93–105.
- White, R., Powell, R., Holland, T.J.B. and Worley, B.A. (2000) The effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system K₂O–FeO–MgO–Al₂O₃–SiO₂–H₂O–TiO₂–Fe₂O₃. *Jour. Metam. Geol.*, **18**, 497–511.
- 山田直利・片田正人・端山好和・山田哲雄・仲井 豊・杳掛俊夫・諏訪兼位・宮川邦彦(1974) 中部地方領家帯地質図, 特殊地質図 no. 18, 地質調査所.
- 山崎 徹(2012) 足助地域の地質, 第4章 領家深成岩類地域地質研究報告(5万分の1地質図幅). 産総研地質調査総合センター, p. 27–50.
- 山崎 徹・青矢睦月・木村希生・宮崎一博(2012) 長野県飯田市, 卯月山苦鉄質複合岩体の岩石学的性質-領家帯における苦鉄質火成作用の成因解明への予察的検討-. 地調研報, **63**, 1–19.

(受 付 : 2013年1月30日 ; 受 理 : 2013年3月22日)