

〔研究ノート〕

シュードセクション法を用いた九州中部肥後変成帯に産する 高度変成岩の解析

小林 記之

要 旨

本研究では、熱力学的解析の「シュードセクション法」を用いて、高度変成岩の解析を行い、九州中部肥後変成帯の変成分帯、変成温度圧力見積もりの推定値との比較、および部分熔融度の推定比較を実施した。その結果、D帯を特徴づけるザクロ石（Grt）+堇青石（Crd）の鉱物共生は、700–850°C、4–7kbarの範囲に出現し、E帯を特徴づける斜方輝石（Opx）の出現および珪線石（Sil）、堇青石（Crd）の消失領域は、D帯の温度圧力領域より高温高压側に分布し、>850°C、>5kbarの範囲に出現することが明らかとなった。また、シュードセクション法の解析と、D帯の従来の変成温度圧力見積もりは調和的である。一方で、E帯では、従来の地質学的温度圧力計を用いた変成温度圧力見積もりと概ね調和的であるが、若干、高温高压条件が推定された。さらに、シュードセクション法の解析から、E帯でのメルトのvol%は>30vol%に達することが推定された。

キーワード：高度変成岩、部分熔融、シュードセクション法

1. はじめに

九州中部肥後変成帯は、高温低压型（high-T/P）変成帯とされており、変成帯南部には、高度変成岩類である泥質片麻岩とともにミグマタイトが産している。変成度は高温部で、角閃岩相からグラニュライト相に達しており、部分熔融が生じていたと考えられている [4, 5, 12, 13]。肥後変成帯は、[10]の鉱物組み合わせによってAからEの5帯に変成分帯され変成度は北から南に向かい上昇しているとされている。肥後変成帯高温部には様々な種類のミグマタイトが産しており、このミグマタイトは、その場での部分熔融により生じたこと、高温部からは全岩組成を変えるほどのK成分にとんだメルト（優白質花崗岩）が低温部へと抜け出したことが指摘されている [4]。部分熔融によって形成されたメルトは低温部へと抜け出る際に、熱と元素を輸送するキャリアーとなっていると考えられている。[5]は全岩化学組成分析から得られた、微量元素組成を用いてモデル計算を実施し、九州中部肥後変成帯

最高温部では部分溶融度が30%程度にまで達していた可能性を議論している。本研究では、熱力学的解析の「シュードセクション法」を用いて、高度変成岩の解析を行い、九州中部肥後変成帯の変成分帯、変成温度圧力見積りとの比較、および部分溶融度の推定比較を実施した。鉱物の略語は、[6]に従っている。

2. 地質概説

九州中部肥後変成帯は、九州中部・臼杵―八代構造線の北側に位置し、東西方向に約25km、南北方向に約7kmの東西性の地質構造からなる。肥後変成帯は、紅柱石―珪線石タイプであり、高温低圧型 (high T/P) の変成帯とみなされている [20]。本変成帯の変成度は北から南に向かって累進的に上昇していること、さらに高温部には高度変成岩である泥質片麻岩とともに、様々なミグマタイトが産しており、上部角閃岩相やグラニュライト相に達しているとされている。地質概説詳細に関しては [5, 7, 8, 9, 12, 13, 16, 20] に詳しく記載されている。本変成帯は、砂泥質変成岩の鉱物組み合わせにより次のA～Eの5帯に変成分帯されている。A帯：緑泥石 (Chl)―白雲母 (Ms), B帯：黒雲母 (Bt)―白雲母 (Ms)―紅柱石 (And), C帯：カリ長石 (Kfs)―珪線石 (Sil)―黒雲母 (Bt), D帯：ザクロ石 (Grt)―堇青石 (Crd)―黒雲母 (Bt), E帯：斜方輝石 (Opx)―ザクロ石 (Grt)―黒雲母 (Bt) [11] (図1)。

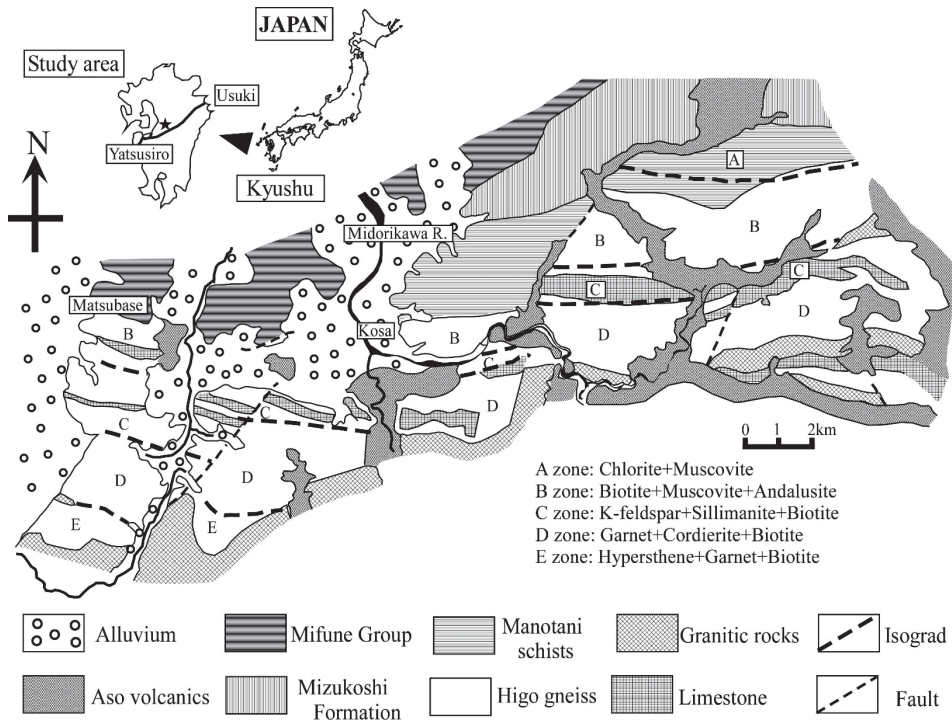


図1 肥後変成帯地質図および変成分帯図 ([10] より)

肥後変成帯高温部D帯, E帯には, 片麻岩とともに泥質岩起源のミグマタイトが分布しており, 部分溶融による形成が指摘されている [4, 5, 12, 13]。また, 肥後変成帯最高温部であるE帯に産するミグマタイトは, 全岩化学組成分析から, Ca成分に富み, K成分に枯渇しているという特徴が見られ, レスタイト (溶け残り) としての特徴を有しており [4], その部分溶融度は30%にも達していた可能性が指摘されている [5]。

3. シュードセクション法を用いた解析

3-1. シュードセクション法

シュードセクション法とは, 岩石中の鉱物共生を全岩化学組成と温度・圧力・その他のパラメーターから制約する解析方法である。近年, 様々な熱力学計算プログラムの進歩にともなって, 広く用いられるようになっていく。本研究では, 九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩を用いて, シュードセクション法の解析を実施した。使用した高度変成岩の泥質片麻岩は, [4] により詳しく記載されている。本変成帯の泥質片麻岩は, C帯およびD帯より採取したものを使用した。シュードセクション法の解析に用いた泥質の高度変成岩の全岩化学組成を表1に示す。この全岩化学組成値は [4] によって報告された, 泥質片麻岩の平均全岩化学組成である。泥質片麻岩は, 部分溶融を示唆する組織を呈していないため, 源岩の全岩化学組成をよく保存していると考えられる。そこで, シュードセクション法の計算には, この全岩化学組成の値を使用し, 圧力-温度領域 (P-T field) を1-12kbar, 600-1000°Cで求めた。シュードセクション法の解析では, [1] のTheriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) とTHERMOCALC [2] の熱力学データベースセットtcd552cdを用いて, NCKFMASHT系のシステムで, 1.0wt%のH₂Oを仮定して計算した。Activity composition relationsは, 黒雲母 (biotite), ザクロ石 (garnet), メルト (melt) は [19], 斜方輝石 (orthopyroxene), スピネル (spinel) は [18], イルメナイト (ilmenite) は [17], 長石 (feldspar) は [3], 堇青石 (cordierite)

表1 肥後変成帯の泥質片麻岩の平均全岩化学組成

	Gneiss
(wt%)	Average
SiO ₂	64.5
TiO ₂	0.8
Al ₂ O ₃	16.5
Fe ₂ O ₃ *	6.5
MnO	0.3
MgO	3.0
CaO	2.8
Na ₂ O	2.7
K ₂ O	2.9
P ₂ O ₅	0.2
total	100.0

* Total Fe as Fe₂O₃

[4]

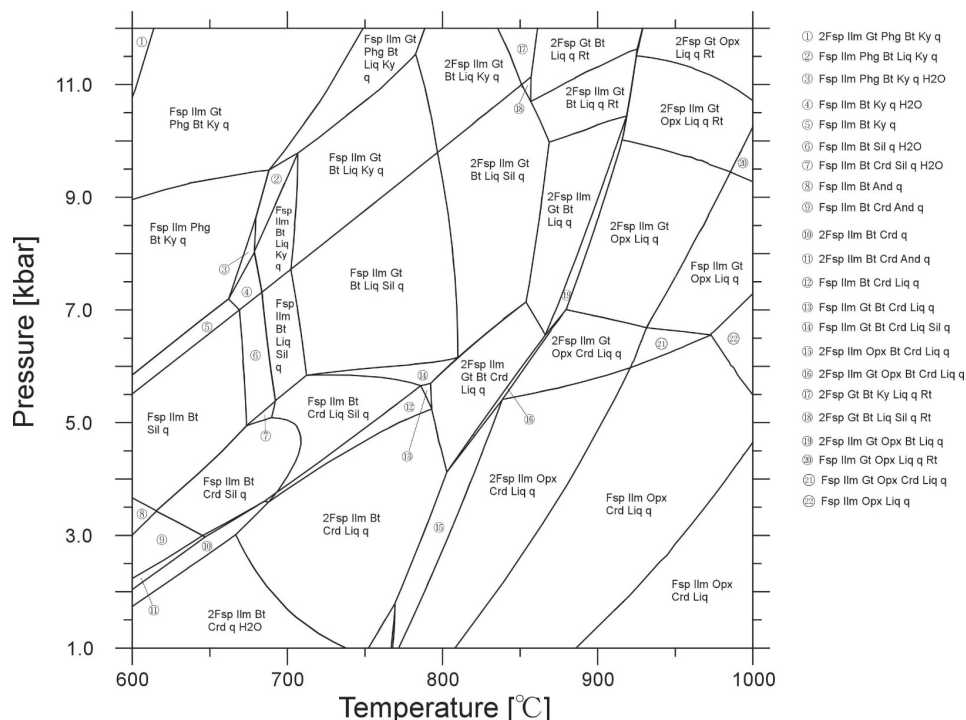


図2 肥後変成帯に産する泥質片麻岩を用いたシュードセクション結果。シュードセクション法の解析では、[1] の Theriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) と THERMOCALC [2] の熱力学データベースセット tcd552cd を用いて、NCKFMASHT 系のシステムで、1.0wt% の H_2O を仮定して計算した。Fsp (長石), Ilm (チタン鉄鉱), Phg (白雲母), Bt (黒雲母), Gt (ザクロ石), Sil (珪線石), Ky (藍晶石), And (紅柱石), Crd (堇青石), Opx (斜方輝石), Liq (メルト), q (石英), H_2O (水), Rt (金紅石)。

は [2] を使用した。シュードセクション法を用いて計算した結果を図2に示す。

3-2. 鉱物組み合わせによる変成分帯とシュードセクション法

本変成帯高温部のD帯, E帯には、片麻岩とともに泥質岩起源のミグマタイトが分布しており、部分溶融による形成が指摘されており [4, 5, 12, 13], 本研究ではシュードセクション法の解析と変成分帯, および部分溶融度について検討をするため、D帯, E帯について比較検討を実施した。

[10] による変成分帯では、D帯はザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd) の鉱物共生の出現, E帯では、斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil), 堇青石 (Crd) の消失で特徴づけられている。

D帯では、ザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd) の鉱物共生は、

黒雲母 (Bt)+珪線石 (Sil)+石英 (Qtz)=ザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd)+カリ長石 (Kfs)+ H_2O (1)
や

黒雲母 (Bt)+珪線石 (Sil)+石英 (Qtz)=ザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd)+カリ長石 (Kfs)+メルト (melt) (2)

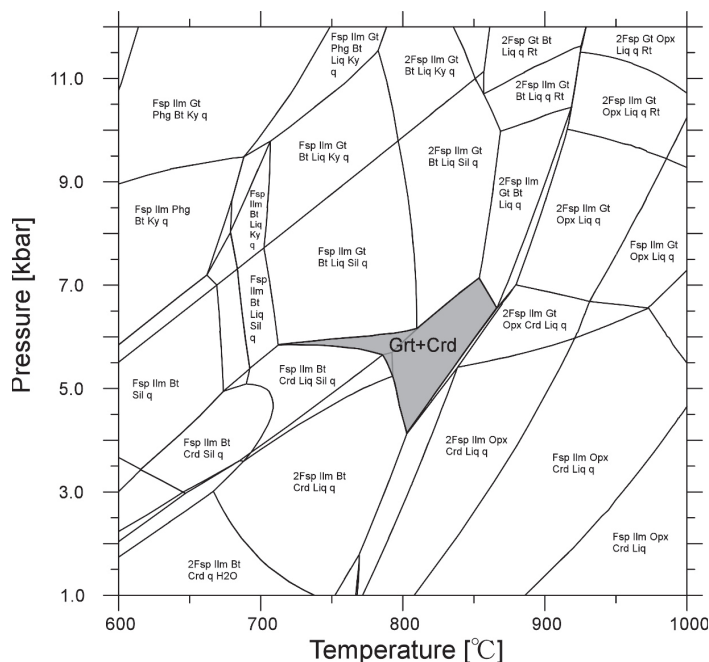


図3a 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果とD帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Opx) の鉱物共生の温度—圧力領域。灰色部分がD帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Opx)。

の反応で形成されたと考えられている [12, 21]。

E帯での、斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil), 堇青石 (Opx) の消失は、
 黒雲母 (Bt)+石英 (Qtz)+H₂O=斜方輝石 (Opx)+メルト (melt) (3)
 や

黒雲母 (Bt)+石英 (Qtz)=斜方輝石 (Opx)+カリ長石 (Kfs)+メルト (melt) (4)
 の部分溶融反応によって形成されたと考えられている [12, 21]。

シュードセクション法による解析では、D帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Opx) の鉱物共生は、700–850°C, 4–7kbarの範囲に出現する (図3a)。一方で、E帯を特徴づける斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil), 堇青石 (Opx) の消失領域は、D帯の温度圧力領域より高温高圧側に分布し、> 850°C, > 5kbarの範囲に出現することが明らかとなった (図3b)。

3-3. 地質学的温度圧力見積もりとシュードセクション法

本変成帯D帯およびE帯の変成温度圧力条件は、[5, 8, 12, 13, 14, 15, 21] らによって見積もられている。地質学的温度圧力計を用いて、D帯の変成温度圧力条件は [12] では、720–840°C, 4.5–6.5kbar, [13, 14, 15] では、740–820°C, 4.8–6kbarが報告されている。[21] では、660–870°C, 3–7.8kbarを報告されている。[8] は、D帯相当のGC I より、700–820°C, 3.3–5kbarを報告している。

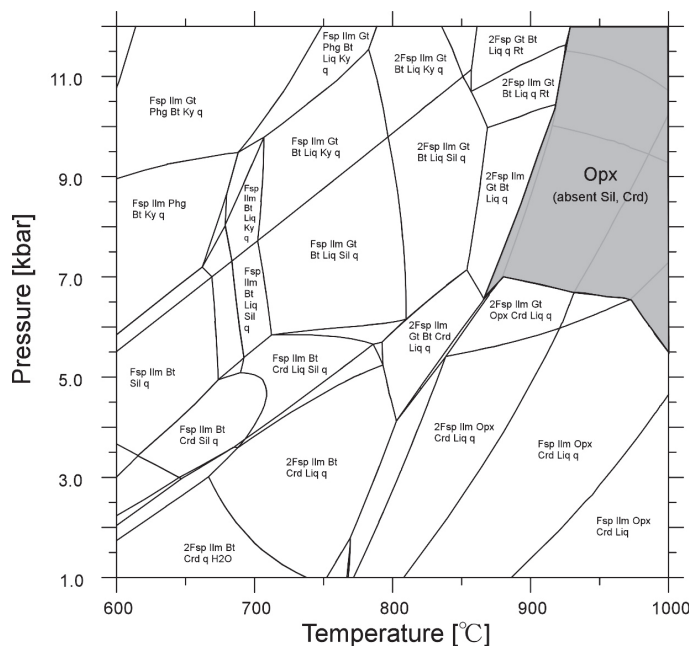


図3b 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果とE帯を特徴づける斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil), 堇青石 (Crd) の消失の温度-圧力領域。灰色部分がE帯を特徴づける斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil), 堇青石 (Crd) の消失領域。

本研究で解析したシュードセクション法の解析では、D帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crđ)の鉱物共生は、700-850°C、4-7kbarの範囲に出現しており、従来の変成温度圧力見積もりと調和的である (図4a)。

一方で、地質学的温度圧力計を用いた、E帯の变成温度圧力条件は[12]では、820–920°C、6–7.5kbarが報告されている。[13, 14, 15]では、800–870°C、6–7.2kbarが報告されている。[21]では、780–930°C、5–8.8kbarが報告されている。[8]は、E帯相当のGC IIより、850°C、5.7kbarを報告している。[5]は800–930°C、5–9kbarと見積もっている。本研究のシュードセクション法による解析では、E帯を特徴づける斜方輝石 (Opx) の出現および珪線石 (Sil)、堇青石 (Crd) の消失する領域は、 $> 850^{\circ}\text{C}$ 、 $> 5\text{kbar}$ が見積もられた。この結果は、従来の地質学的温度圧力計を用いた变成温度圧力見積もりと概ね調和的であるが、若干、高温高压条件が推定された (図4b)。

3-4. シュードセクション法を用いた部分溶解度の推定

シュードセクション法による部分溶融度に関して、[1] の Theriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) と THERMOCALC [2] の熱力学データベースセット tcdb552cdを用いて、NCKFMASHT系のシステムで、1.0wt%のH₂Oを仮定してメルトのvol%を計算で求めた。結果を図5に示す。本変成帯D帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+華青石 (Crd)の鉱物共生は、700–

シュードセクション法を用いた九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩の解析

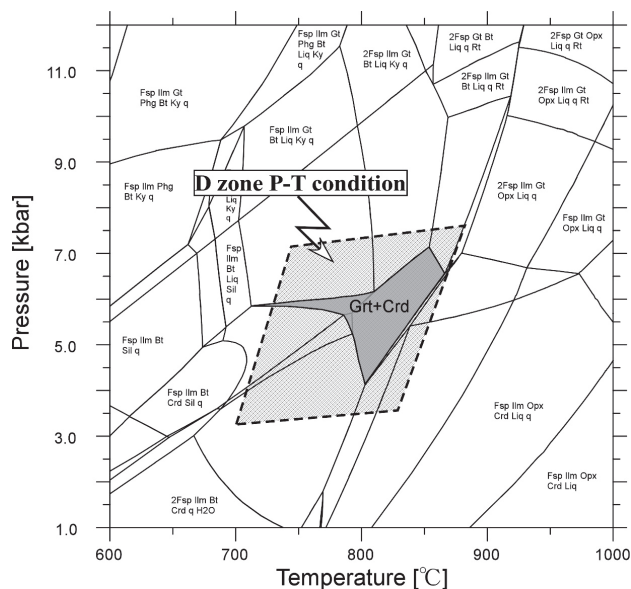


図4a 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果と肥後変成帯D帯の変成温度圧力条件 (Metamorphic P-T condition of D zone)。点線および斜線範囲が, [8, 12, 13, 14, 15, 21] による変成温度圧力見積もり。

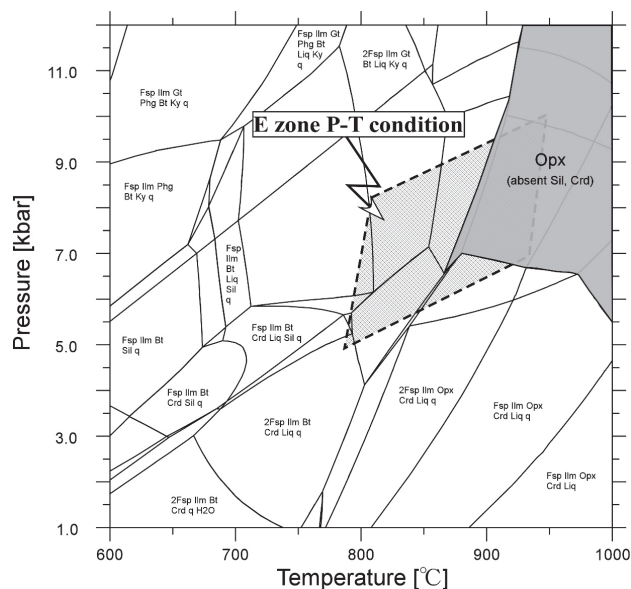


図4b 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果と肥後変成帯E帯の変成温度圧力条件 (Metamorphic P-T condition of E zone)。点線および斜線範囲が, [5, 8, 12, 13, 14, 15, 21] による変成温度圧力見積もり。

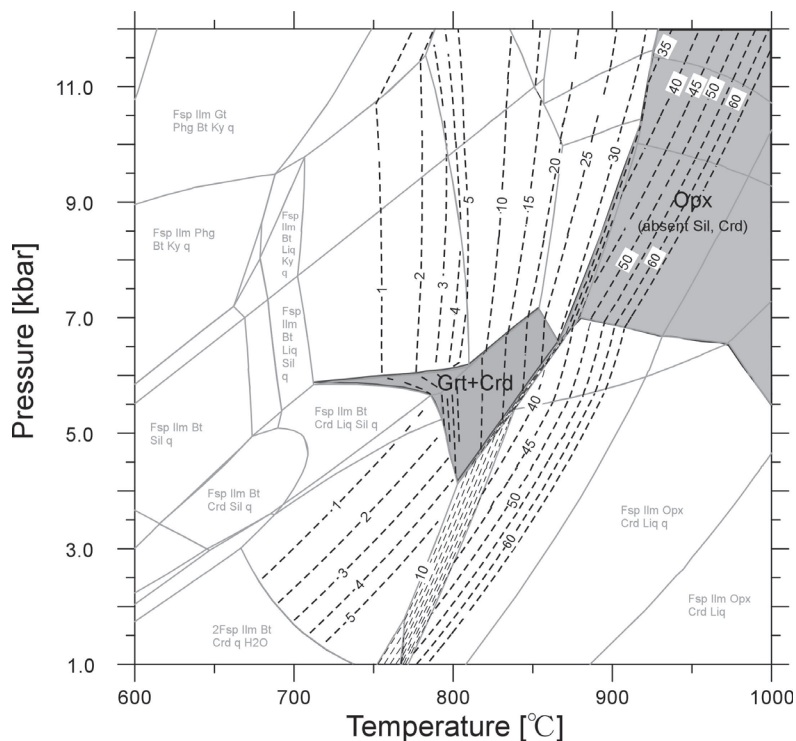


図5 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果と、部分熔融メルトのvol%結果。点線が部分熔融によるメルトのvol%計算結果。

850°C、4–7kbarの範囲であり、部分熔融によるメルトは変成温度に依存して、0–30vol%であった。一方でE帯を特徴づける斜方輝石（Opx）の出現および珪線石（Sil）、堇青石（Crd）の消失領域は、>850°C、>5kbarの範囲であり、メルトは>30vol%に達することがシュードセクション法の計算により推定された。

本変成帯のD帯、E帯では、これまでの研究によって [4, 5, 12, 13]、部分熔融による形成が指摘されており、本研究のシュードセクション法による解析からも部分熔融による形成が強く示唆される結果となった。また、[5] 全岩化学組成分析から得られた、微量元素組成を用いてモデル計算を実施し、本変成帯のE帯では部分熔融度が30%程度にまで達していたと推定しており、本研究のシュードセクション法による解析からの部分熔融メルトの推定とも整合的である。

4. まとめ

本研究では、九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩の全岩化学組成を用いて、シュードセクション法の解析を実施した。

その結果、D帯を特徴づけるザクロ石（Grt）+堇青石（Crd）の鉱物共生は、700–850°C、4–7kbarの範囲に出現し、E帯を特徴づける斜方輝石（Opx）の出現および珪線石（Sil）、堇青石（Crd）の消

失領域は、D帯の温度圧力領域より高温高压側に分布し、 $> 850^{\circ}\text{C}$ 、 $> 5\text{kbar}$ の範囲に出現することが明らかとなった。

本研究のシュードセクション法による解析から、D帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd)の鉱物共生は、 $700\text{--}850^{\circ}\text{C}$ 、 $4\text{--}7\text{kbar}$ の範囲に出現しており、従来の変成温度圧力見積もりと調和的である。一方で、シュードセクション法による解析では、E帯を特徴づける斜方輝石 (Opx)の出現および珪線石 (Sil)、堇青石 (Crd)の消失する領域は、 $> 850^{\circ}\text{C}$ 、 $> 5\text{kbar}$ が見積もられており、この結果は、従来の地質学的温度圧力計を用いた変成温度圧力見積もりと概ね調和的であるが、若干、高温高压条件が推定された。

さらに、シュードセクション法の解析から、メルトのvol%の計算を行った。その結果、本変成帯D帯を特徴づけるザクロ石 (Grt)+堇青石 (Crd)の鉱物共生は、 $700\text{--}850^{\circ}\text{C}$ 、 $4\text{--}7\text{kbar}$ の範囲であり、部分熔融によるメルトは変成温度に依存して、 $0\text{--}30\text{vol}\%$ であった。一方でE帯を特徴づける斜方輝石 (Opx)の出現および珪線石 (Sil)、堇青石 (Crd)の消失領域は、 $> 850^{\circ}\text{C}$ 、 $> 5\text{kbar}$ の範囲であり、メルトは $> 30\text{vol}\%$ に達することがシュードセクション法の計算により推定された。

謝辞

本研究を行うにあたり、京都大学大学院理学研究科地鉱教室の小畑正明教授、京都大学副学長の平島崇男教授には終始にわたり懇切丁寧なご指導をいただき感謝いたします。九州大学の小山内康人教授には野外調査において議論いただき感謝いたします。薄片作成において、技官の堤久雄氏、吉田金三氏にはお世話になりました。最後になりましたが、故 廣美里准教授には公私ともに大変お世話になりました。特に、スポーツ健康分野を専門としない私に、様々な教育・研究に関して、いつも笑顔でとてもやさしく助言をいただきました。謹んで感謝と哀悼の意を表します。

文献

- [1] de Capitani, C. and Petrakakis, K. (2010). The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95, 1006–1016.
- [2] Holland, T. J. B. and Powell, R. (1998). An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 309–343.
- [3] Holland, T. J. B. and Powell, R. (2003). Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 145, 492–501.
- [4] Kobayashi, T, Obata, M. and Yoshimura, Y. (2005) Diatexite and metatexite from the Higo metamorphic rocks, west-central Kyushu, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 100, pp. 1–25.
- [5] 小林記之 (2016) 九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩及びミグマタイトの部分熔融度 名古屋学院大学論集 人文・自然科学篇 第52巻 第2号 37–56.
- [6] Kretz, R. (1983) Symbols for rock forming minerals. *Amer. Mineral.*, v. 68, pp. 277–279.

- [7] Maki, K., Ishizaka, Y. and Nishiyama, T. (2004) Staurolite-bearing gneiss and re-examination of metamorphic zonal mapping of the Higo metamorphic terrane in the Kosa area, central Kyushu, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, v. 99, pp. 1–18.
- [8] Miyazaki, K. (2004) Low-P-high-T metamorphism and the role of heat transport by melt migration in the Higo Metamorphic Complex, Kyushu, Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 22(9), pp. 793–809.
- [9] 永川勝久・小畑正明・吉村康隆 (1991) 肥後変成岩 I, 変成分帯—とくに Opx の出現について。日本地質学会第 98 会学術大会講演要旨, p. 315.
- [10] Nagakawa, K., Yoshimura, Y. Obata, M. and Osanai, Y. (1992) The Higo metamorphic belt and migmatite. Field trip guide of the 99th Annual Meeting of the Geological Society of Japan, pp. 33–49 (in Japanese).
- [11] Nagakawa, K., Obata, M. and Itaya, T. (1997) K-Ar ages of the Higo metamorphic belt. *Journal of the Geological Society of Japan*, v. 103, pp. 943–952.
- [12] Obata, M., Yoshimura, Y., Nakagawa, K., Odawara, S. and Osanai, Y. (1994) Crustal anatexis and melt migrations in the Higo metamorphic terran, west-central Kyusyu, Kumamoto, Japan. *Lithos*, v. 32, pp. 135–147
- [13] Osanai, Y., Hamamoto, T., Kamei, A., Owada. and M., Kagami, H. (1996) High-temperature metamorphism and crustal evolution of the Higo metamorphic terrane, central Kyushu, Japan. *Tectonics and Metamorphism (The Hara Volume)*, SOUBUN Co., Ltd., pp. 113–124.
- [14] Osanai, Y., Hamamoto, T., Maishima, O. and Kagami, H. (1998) Sapphirine-bearing granulites and related high-temperature metamorphic rocks from the Higo metamorphic terrane, west central Kyusyu, Japan. *Jurnal of Metamorphic Geology*, v. 16, pp. 53–66.
- [15] Osanai, Y., Kamei, A., Owada, M. and Hamamoto, T. (2001) Tectono-metamorphic evolution and related igneous activities of Higo metamorphic terrane, west-central Kyushu (explanatory text and field guide). *Report of tectonics working group in Kyushu*, v. 5, pp. 1–62.
- [16] Tsuji, S. (1967) Petology of the Higo metamorphic Complex in the Kosa-Hamamachi area, Kumamoto prefecture, Kyusyu, Japan. *Japan Jour. Geogr.*, 38, pp. 13–25.
- [17] White, R. W., Powell, R., Holland, T. J. B. and Worley, B. A. (2000). The effect of TiO_2 and Fe_2O_3 on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system $\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$. *Journal of Metamorphic Geology* 18, 497–511.
- [18] White, R. W., Powell, R. and Clarke, G. L. (2002). The interpretation of reaction textures in Fe-rich metapelitic granulites of the Musgrave Block, central Australia: constraints from mineral equilibria calculations in the system $\text{K}_2\text{O}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 41–55.
- [19] White, R. W., Powell, R. and Holland, T. J. B. (2007). Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology* 25, 511–527.
- [20] Yamamoto, H. (1962) Pultonic and metamorphic rocks along the Usuki-Yatushiro tectonic line in the western part of central kyusyu. *Bull. Fukuoka Gakugei Univ.*, 12, part III, pp. 93–172
- [21] Yoshimura, Y. (2004) Mineral chemistry of the politic gneisses and migmatites from Higo metamorphic rocks, west-central Kyushu, Japan. *Memoris of Faculty of Science, Kochi University, Series E, Geology*, Vol. 25, pp. 9–33.

[Research Note]

Pseudosection for high-grade metamorphic rocks from the Higo metamorphic terrane, central Kyushu, SW Japan.

Tomoyuki Kobayashi

Abstract

Phase equilibrium relationships for the pelitic gneisses were estimated by pseudosection method using the bulk rock composition of High-grade metamorphic rock from the Higo metamorphic terrane, central Kyushu, Japan. Zone D is characterized by the stability of garnet and cordierite, and zone E by the appearance of hypersthene in the absence of sillimanite and cordierite. In the calculated phase diagram, the garnet + cordierite assemblage (zone D) is stable at 700–850°C and 4–7 kbar. The appearance of hypersthene in the absence of sillimanite and cordierite (zone E) appears at $> 850^{\circ}\text{C}$ and > 5 kbar in the calculated phase diagram. These results are consistent with the previous P–T estimation from conventional geothermobarometers methods. The vol% of the melt in zone E was estimated to be > 30 vol% by pseudosection calculation.

Keywords: High-grade metamorphic rocks, Partial melting, Pseudosection