

[論文]

九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩の 変成温度圧力見積もり

— シュードセクション解析 —

小林 記之

名古屋学院大学スポーツ健康学部

要 旨

九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩（D帯，E帯）中のザクロ石の化学組成を用いて，熱力学的解析の「シュードセクション法」から，D帯およびE帯の変成温度圧力を見積もった。その結果，D帯では，約700–780°C，5–8 kbarが見積もられ，E帯では，D帯より高温高压側の，約750–850°C，7–10 kbarが見積もられた。この，解析結果と，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は調和的である。しかし，シュードセクション法による鉱物共生の解析から，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，> 5 kbarの範囲に出現している。つまり，シュードセクション法によるザクロ石の化学組成から見積もったE帯の変成温度圧力は，鉱物共生の解析より低温が見積もられたことになる。さらに顕著な組成累帯構造を示すザクロ石のコアの化学組成を用いて，ザクロ石コア形成時の温度圧力を推定したところ，約300–450°C，7–10 kbarが見積もれる。組成累帯構造を示すザクロ石は比較的，低温高压条件下で生成し，その後高温条件に達したことが推測される。

キーワード：高度変成岩，ザクロ石，シュードセクション法，変成温度圧力

Metamorphic P-T condition for high-grade metamorphic rocks from the Higo metamorphic terrane, central Kyushu, SW Japan.

— Pseudosection analysis —

Tomoyuki KOBAYASHI

Faculty of Health and Sports
Nagoya Gakuin University

発行日 2022年7月31日

1. はじめに

岩石学的研究における変成温度圧力条件の見積もりには、地質学的温度圧力計や岩石成因論的グリッドの解析などが使用されている。近年、熱力学的データを基にしたシュードセクション法という新たな手法が確立されている。シュードセクション法は、岩石の全岩化学組成と温度・圧力などのパラメーターから、鉱物共生を制約する手法であり、熱力学計算プログラムの発展に伴い、広く使用されるようになってきた。

九州中部肥後変成帯は、永川ほか（1992）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。肥後変成帯の高温部は、角閃岩相からグラニュライト相に達しており、部分溶融が生じていたと考えられている（e.g. Obata et al., 1994; Osanai et al., 1996; Kobayashi et al., 2005; 小林2016）。小林（2022）は、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行い、鉱物共生から、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、および部分溶融度の推定比較を実施している。本研究では、さらに熱力学的解析の「シュードセクション法」を用いて、高度変成岩中に含まれるザクロ石の化学組成から、変成温度圧力見積もりの推定を実施した。鉱物の略語は、Kretz（1983）に従っている。

2. 地質概説

九州中部肥後変成帯の地質学的・岩石学的研究は、これまで数多くなされてきている。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25 km、南北方向に約7 kmの東西性の地質構造からなり、帯状に分布している（図1）。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（Yamamoto, 1962）。肥後変成帯は、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）（Nagakawa et al., 1997）（図1）。Miyazaki（2004）は低温部から高温部にかけて、Biotite zone, Sillimanite zone, Garnet-cordierite I（GC I）zone, Garnet-cordierite II（GC II）zoneに再区分した。Miyazaki（2004）の変成分帯である高温部のGC I zone, およびGC II zoneは、Nagakawa et al.（1997）の変成分帯のD帯, E帯に相当している。この変成分帯の再構築は本研究には影響がほぼないため、従来のNagakawa et al.（1997）の変成分帯を使用する（図1）。

地質概説に関しては、Yamamoto（1962）、Tsuji（1967）、永川ほか（1991）、Obata et al.（1994）、Osanai et al.（1996）、Maki et al.（2004）、Miyazaki（2004）、小林（2016）、小林（2022）に詳しく記載されている。本研究では、肥後変成帯に産するミグマタイトをBrown（1973）の定義に基づいて定義し分類しており、ミグマタイトの詳細な記載については、小林（2016）に詳しく記載されている。

肥後変成帯高温部D帯, E帯には、高度変成岩とともにミグマタイトが分布しており、部分溶融に

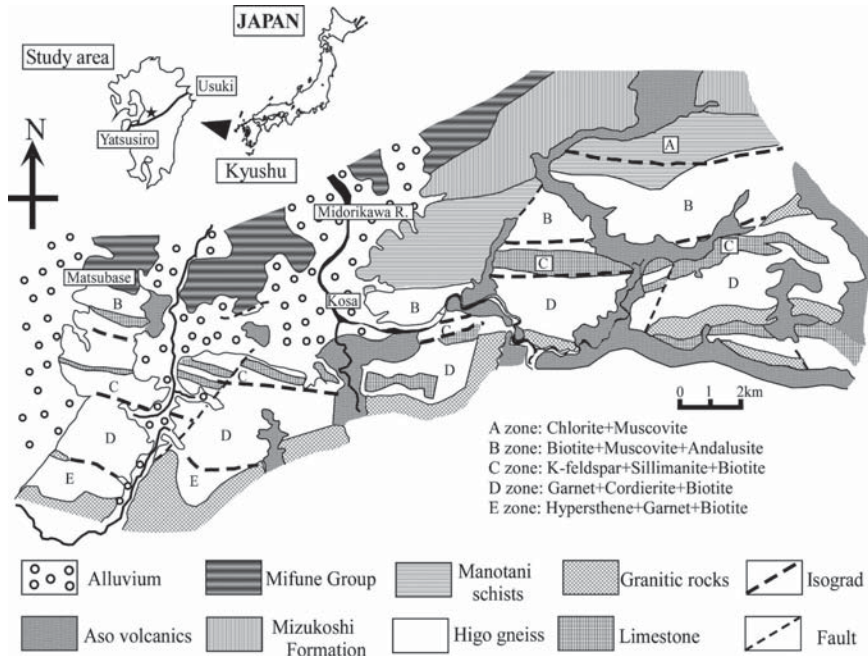


図1 肥後変成帯地質図および変成分帯図 (Nagakawa et al., 1992 より)。

よる形成が指摘されている (e.g. Obata et al., 1994; Osanai et al., 1996; Kobayashi et al., 2005; 小林 2016)。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、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 (小林 2016, 2022)。

3. シュードセクション解析

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。シュードセクション法の解析に使用した高度変成岩の泥質片麻岩は、小林 (2022) で報告されたものと同じものを使用した。使用した高度変成岩の詳細は、Obata et al. (1994) および Kobayashi et al. (2005) に記載されている。全岩化学組成値は、Kobayashi et al. (2005) によって報告されている、泥質片麻岩の平均全岩化学組成であり、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、本研究の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 (Kobayashi et al., 2005; 小林, 2022) を使用し、小林 (2022) で報告された圧力-温度領域 (PT field) よりさらに圧力-温度領域を低温側に拡大した200-1000°C, 1-12 kbarで求めた。シュードセクション法の解析では、de Capitani & Petrakakis (2010) の Theriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) と THERMOCALC (Holland & Powell, 1998) の熱力学データベースセット tcdb55c2d 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。使用した全岩化学組成は、SiO₂: 64.5%; Al₂O₃: 16.5%; CaO: 2.8%; K₂O: 2.9%; Na₂O: 2.7%; MnO: 0.3%; MgO: 3.0%; Fe₂O₃: 6.5% (Total Fe as Fe₂O₃); TiO₂: 0.40%; P₂O₅: 0.2%; H₂O: 1.0%である。Activity composition

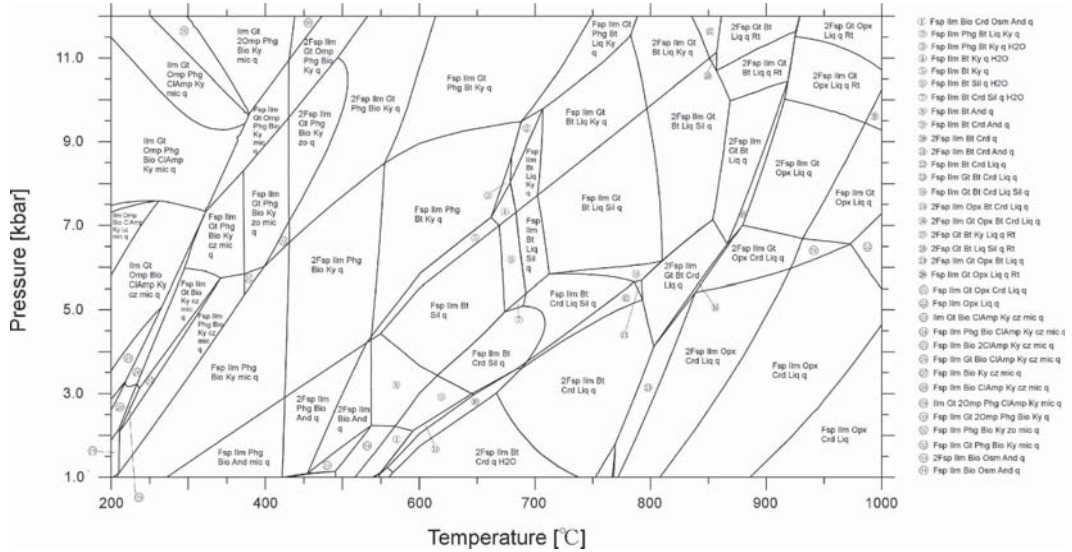


図2 肥後変成帯に産する泥質片麻岩を用いたシュードセクション結果。シュードセクション法の解析では、圧力-温度領域 (P-T field) 200–1000°C, 1–12 kbar で、de Capitani & Petrakakis (2010) の Theriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) と THERMOCALC (Holland & Powell, 1998) の熱力学データベースセット tcd55c2d を用いて、NCKFMASHT 系のシステムで、1.0 wt% の H₂O を仮定して計算した。Fsp (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), H₂O (水), Rt (金紅石), zo (灰簾石), Omp (オンファス輝石), mic (雲母), cz (単斜灰簾石), ClAmp (角閃石), Osm (大隅石)。

relations は、黒雲母 (biotite), ザクロ石 (garnet), メルト (melt) は White et al. (2007), 斜方輝石 (orthopyroxene), スピネル (spinel) は White et al. (2002), イルメナイト (ilmenite) は White et al. (2000), 長石 (feldspar) は Holland & Powell (2003), 堇青石 (cordierite) は Holland & Powell (1998) 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。

4. 高度変成岩中のザクロ石の化学組成

鉱物の化学組成の測定には、KeveX Quantum 8000型検出器を装備したHITACHI S550型走査型電子顕微鏡を使用した。測定条件は、加速電圧20kV, ビーム径5μm, で分析を行い、補正方法は、Mori and Kanehira (1984), Hirajima and Banno (1991) に従い、補正計算はZAF法を用いた。

ザクロ石の almandine (alm) 成分, pyrope (prp) 成分, grossular (grs) 成分, spessartine (sps) 成分は次の計算から求めている。 $X_{alm} = Fe / (Fe + Mg + Ca + Mn)$, $X_{prp} = Mg / (Fe + Mg + Ca + Mn)$, $X_{grs} = Ca / (Fe + Mg + Ca + Mn)$, $X_{sps} = Mn / (Fe + Mg + Ca + Mn)$ 。

肥後変成帯に産する高度変成岩中のザクロ石は、組成累帯構造を示すものが多く、粗粒ザクロ石 (> 10mm) のコアは微細な包有物が配列したセクト構造を示すことがあり (図3), コアからリムに向かい、 $X_{Mg} = Mg / (Fe + Mg)$ は増加する傾向にある。代表的なザクロ石の組成値を表1に示す。

表1 肥後変成帯に産する高度変成岩およびグマタイト中のザクロ石の化学組成。

Zone	D zone		D zone		D zone (South)		D zone (South)		E zone		E zone		E zone	
	Metatexite Core	Metatexite Rim	Diatexite Core	Diatexite Rim	Diatexite Core	Diatexite Rim	Diatexite Core	Diatexite Rim	Metatexite Core	Metatexite Rim	Diatexite Core	Diatexite Rim	Diatexite Core	Diatexite Rim
oxide wt%														
SiO ₂	38.68	38.49	38.42	37.70	37.76	38.09	37.51	38.44	38.26	38.83				
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Al ₂ O ₃	21.25	21.17	21.08	20.77	20.84	21.04	20.69	21.28	20.83	21.3				
FeO*	27.35	31.26	29.90	30.09	31.83	31.99	31.22	30.86	28.53	29.56				
MnO	2.71	2.03	3.92	3.7	2.9	1.12	3.92	1.88	4.24	3.99				
MgO	5.84	5.96	5.60	5.70	5.02	6	4.36	6.46	3.06	3.54				
CaO	4.16	1.06	0.92	0.64	1.19	1.01	1.31	1.27	4.87	4.9				
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
TOTAL	99.99	99.97	99.84	98.47	99.54	99.25	99.01	100.19	99.79	102.14				
No. of cations														
Si	3.03	3.03	3.04	3.03	3.02	3.02	3.02	3.02	3.05	3.03				
Ti	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Al	1.96	1.97	1.96	1.96	1.96	1.97	1.96	1.97	1.96	1.96				
Fe	1.79	2.06	1.98	2.02	2.13	2.12	2.10	2.03	1.90	1.93				
Mn	0.18	0.14	0.26	0.24	0.20	0.08	0.27	0.12	0.29	0.26				
Mg	0.68	0.70	0.66	0.68	0.60	0.71	0.52	0.76	0.36	0.41				
Ca	0.35	0.09	0.08	0.06	0.10	0.09	0.11	0.11	0.42	0.41				
Na	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
K	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
Total	7.99	7.98	7.98	7.99	8.00	7.99	8.00	8.00	7.97	7.99				
X _{Mg}	0.28	0.25	0.25	0.25	0.22	0.25	0.20	0.27	0.16	0.18				
X _{Alm}	0.60	0.69	0.66	0.67	0.70	0.71	0.70	0.67	0.64	0.64				
X _{Prp}	0.23	0.23	0.22	0.23	0.20	0.24	0.17	0.25	0.12	0.14				
X _{Grs}	0.12	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.14	0.14				
X _{Spss}	0.06	0.05	0.09	0.08	0.06	0.03	0.09	0.04	0.10	0.09				

*—Total Fe as FeO

Selected analyses of garnet.

Yoshimura and Ohata (1995)

Rock type	D zone		D zone		D zone		D zone	
	Core	gneiss	Core	gneiss	Core	gneiss	Core	gneiss
Grt-Bt-Crd	37.56	37.93	37.56	37.93	37.56	37.93	37.56	37.93
Core	0.14	-	0.14	-	0.14	-	0.14	-
gneiss	21.34	21.59	21.34	21.59	21.34	21.59	21.34	21.59
Core	15.05	30.70	15.05	30.70	15.05	30.70	15.05	30.70
gneiss	16.77	4.81	16.77	4.81	16.77	4.81	16.77	4.81
Core	0.12	4.42	0.12	4.42	0.12	4.42	0.12	4.42
gneiss	9.83	1.49	9.83	1.49	9.83	1.49	9.83	1.49
Core	-	-	-	-	-	-	-	-
gneiss	-	-	-	-	-	-	-	-
Core	100.81	100.94	100.81	100.94	100.81	100.94	100.81	100.94
gneiss	2.99	3.00	2.99	3.00	2.99	3.00	2.99	3.00
Core	0.01	-	0.01	-	0.01	-	0.01	-
gneiss	2.00	2.01	2.00	2.01	2.00	2.01	2.00	2.01
Core	1.00	2.03	1.00	2.03	1.00	2.03	1.00	2.03
gneiss	1.13	0.32	1.13	0.32	1.13	0.32	1.13	0.32
Core	0.01	0.52	0.01	0.52	0.01	0.52	0.01	0.52
gneiss	0.84	0.13	0.84	0.13	0.84	0.13	0.84	0.09
Core	-	-	-	-	-	-	-	-
gneiss	-	-	-	-	-	-	-	-
Core	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	7.99
gneiss	0.01	0.20	0.01	0.20	0.01	0.20	0.01	0.13
Core	0.336	0.677	0.336	0.677	0.336	0.677	0.336	0.721
gneiss	0.005	0.174	0.005	0.174	0.005	0.174	0.005	0.103
Core	0.281	0.042	0.281	0.042	0.281	0.042	0.281	0.031
gneiss	0.379	0.107	0.379	0.107	0.379	0.107	0.379	0.145

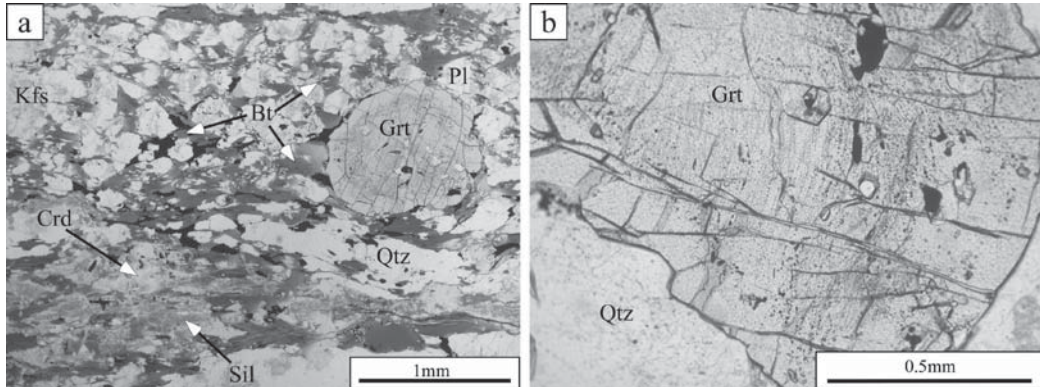


図3 肥後変成帯に産する高度変成岩 (Metatexite : D帯) の顕微鏡写真 (オープンニッケル像)。(a) 微細な包有物が配列したセクト構造を示すザクロ石 (Grt), 黒雲母 (Bt), 堇青石 (Crd), 珪線石 (Sil), 斜長石 (Pl), カリ長石 (Kfs), 石英 (Qtz)。(b) 微細な包有物が配列したセクト構造を示すザクロ石 (Grt) の拡大写真。

肥後変成帯のD帯のMetatexiteに含まれているザクロ石のコアのXMgは0.13-0.28と幅を持ち, Xalm 0.59-0.77, Xprp 0.12-0.23, Xgrs 0.03-0.12, Xsps 0.04-0.15の組成を示し, リムでのXMgは0.13-0.26の幅を持ち, Xalm 0.65-0.79, Xprp 0.09-0.23, Xgrs 0.03-0.04, Xsps 0.04-0.23の組成を持つ。D帯のDiatexiteに含まれているザクロ石のコアは, XMgが0.24-0.26で, Xalm 0.66-0.67, Xprp 0.21-0.22, Xgrs 0.02-0.03, Xsps 0.08-0.09である。リムでのXMgは0.08-0.14の幅を持ち, Xalm 0.75-0.78, Xprp 0.08-0.23, Xgrs 0.02-0.03, Xsps 0.08-0.13の組成を示し, 比較的均質な組成である。

D帯とE帯との境界付近に現れるInhomogenous diatexiteに含まれるザクロ石のコアのXMgは0.19-0.21で, Xalm 0.70-0.75, Xprp 0.18-0.20, Xgrs 0.02-0.04, Xsps 0.05-0.06の組成を示す。リムでのXMgは0.12-0.25の幅を持ち, Xalm 0.70-0.77, Xprp 0.11-0.24, Xgrs 0.02-0.04, Xsps 0.03-0.08の組成を持つ。

E帯のMetatexiteに含まれているザクロ石のコアのXMgは0.19-0.27と幅を持ち, Xalm 0.66-0.72, Xprp 0.17-0.24, Xgrs 0.03-0.04, Xsps 0.06-0.09の組成を示す。リムでのXMgは0.12-0.28の幅を持ち, Xalm 0.66-0.75, Xprp 0.10-0.25, Xgrs 0.03-0.05, Xsps 0.04-0.18の組成を持つ。E帯のDiatexiteに含まれるザクロ石のコアのXMgは0.15-0.16で, Xalm 0.62-0.63, Xprp 0.11-0.12, Xgrs 0.14-0.15, Xsps 0.10-0.11の組成を持ち, リムでのXMgは0.15-0.18の幅を持ち, Xalm 0.63-0.65, Xprp 0.12-0.14, Xgrs 0.13-0.15, Xsps 0.08-0.10であり比較的均質な組成を示している。

D帯, E帯に産するミグマタイト中のザクロ石は, almandine (alm) 成分に富んでおり, コアでの組成にばらつきがあるものの, pyrope (prp) 成分が乏しく, grossular (grs) 成分にやや富む傾向がみられる。一方で, D帯, E帯に産するザクロ石のリムは, pyrope (prp) 成分に富み, grossular (grs) 成分が乏しい傾向がみられる。

また, ザクロ石のリムの組成では, D帯に産するミグマタイト中のザクロ石に比べ, D帯とE帯との境界付近に現れるInhomogenous diatexiteに含まれるザクロ石および, E帯に産するミグマタイト中のザクロ石の方が, pyrope (prp) 成分, grossular (grs) 成分に富むものがみられる。

また, Yoshimura and Obata (1995) は, D帯に産する高度変成岩(ザクロ石—黒雲母—堇青石片麻岩)から顕著な組成累帯構造を示す, ザクロ石を報告している。このザクロ石のコアの組成は, $X_{\text{alm}} 0.336$, $X_{\text{prp}} 0.005$, $X_{\text{grs}} 0.281$, $X_{\text{sps}} 0.379$ であり, コアで非常に高いgrossular (grs) 成分を示す。さらに, コアとリムの境界部で $X_{\text{alm}} 0.677$, $X_{\text{prp}} 0.174$, $X_{\text{grs}} 0.042$, $X_{\text{sps}} 0.107$ であり, リム部では $X_{\text{alm}} 0.721$, $X_{\text{prp}} 0.103$, $X_{\text{grs}} 0.031$, $X_{\text{sps}} 0.145$ を報告している。Yoshimura and Obata(1995)のザクロ石の組成分析値も表1にまとめた。

5. シュードセクション法を用いたザクロ石の化学組成

シュードセクション法による肥後変成帯に産する高度変成岩中のザクロ石の化学組成に関して, de Capitani & Petrakakis (2010) のTheriak-Domino software (updated domino 03-01-2012 version) と THERMOCALC (Holland & Powell, 1998) の熱力学データベースセット tcdb55c2dを用いて, NCKFMASHT系のシステムで, 1.0wt%の H_2O を仮定してpyrope (prp) 成分: $X_{\text{prp}} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$, grossular (grs) 成分: $X_{\text{grs}} = \text{Ca}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ を計算で求め, ザクロ石のpyrope (prp) 成分とgrossular (grs) 成分のIsoplethを得た。ザクロ石のpyrope (prp) 成分とgrossular (grs) 成分のIsopleth結果をそれぞれ図4, 図5に示す。

シュードセクションで求めた, 圧力—温度領域 (P-T field) 200–1000°C, 1–12 kbarでは, ザクロ

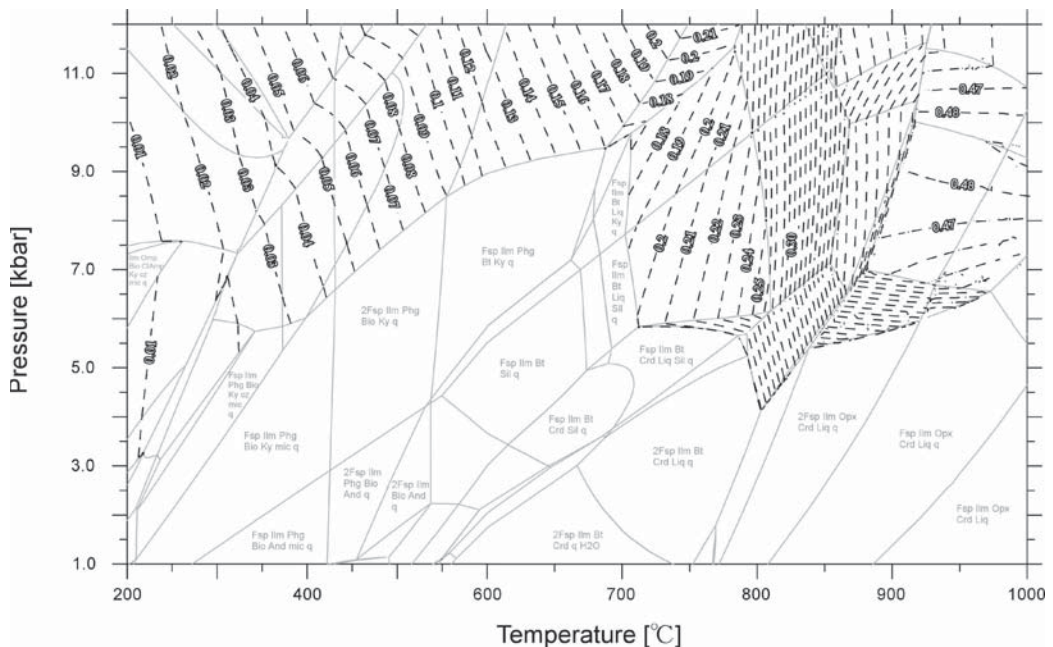


図4 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果とシュードセクションで求めた, ザクロ石のpyrope (prp) 成分: $X_{\text{prp}} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth。黒点線が, ザクロ石のpyrope (prp) 成分: $X_{\text{prp}} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth。白抜き数値がpyrope (prp) 成分: $X_{\text{prp}} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ の値。

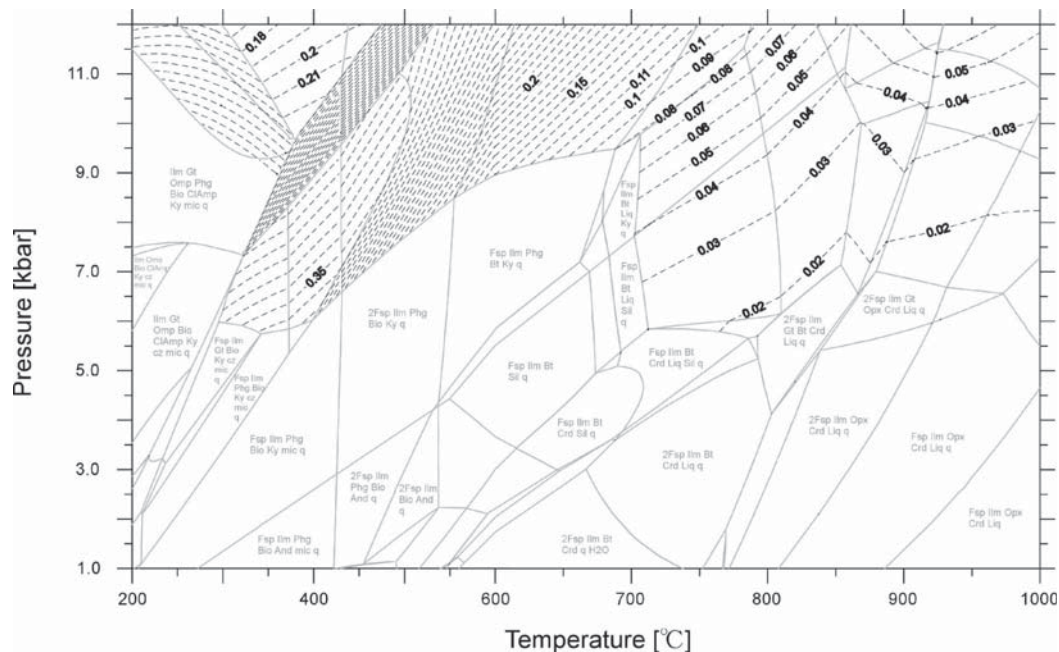


図5 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果とシュードセクションで求めた、ザクロ石の grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn)$ Isopleth。黒点線が、ザクロ石の grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn)$ Isopleth。数値が grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe+Mg+Ca+Mn)$ の値。

石の pyrope (prp) 成分： $X_{prp} = Mg/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isopleth は、ほとんどの圧力-温度領域で立っており、温度の上昇とともに、0.01から0.49まで増加していることがわかる。しかし、 $> 850^{\circ}\text{C}$ 、 > 7.0 kbarの領域では、ザクロ石の pyrope (prp) 成分： $X_{prp} = Mg/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isoplethは横に寝ており、圧力依存が大きいことがわかる(図4)。

一方で、シュードセクションで求めた、圧力-温度領域 (P-T field) 1-12 kbar, $200-1000^{\circ}\text{C}$ では、ザクロ石の grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isoplethは、ほとんどの圧力-温度領域で横になっており、概ね圧力の上昇とともに、0.02から0.41まで上昇する。ただし、低温高圧領域 $200-1000^{\circ}\text{C}$, 7-12 kbarでは、圧力の上昇とともに、ザクロ石の grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isoplethは減少がみられる(図5)。

一般的に、ザクロ石の pyrope (prp) 成分は、変成温度の上昇に伴って増加することが知られており、またザクロ石の grossular (grs) 成分は変成圧力に強く依存しており、圧力の上昇に伴って増加することが知られている。本研究のシュードセクション法による肥後変成帯に産する高度変成岩中のザクロ石の化学組成 Isoplethも同様の傾向を示しており、調和的な結果が得られた。

6. シュードセクション法を用いたザクロ石の化学組成からみた変成温度圧力

肥後変成帯に産する高度変成岩およびミグマタイトが経験した高温時の変成温度圧力条件を推定す

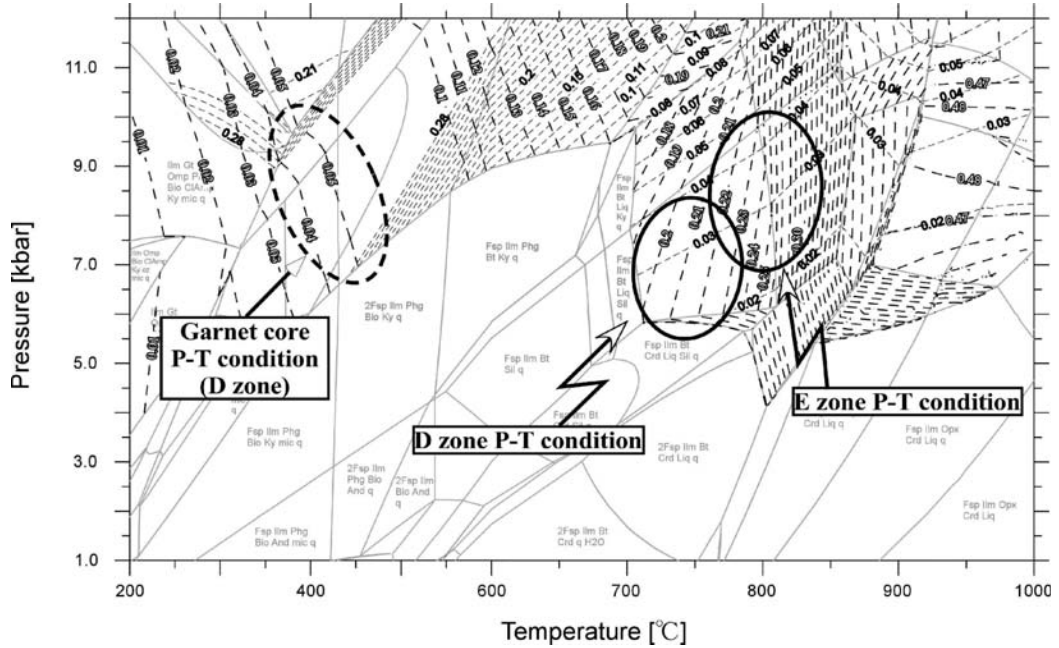


図6 肥後変成帯に産する泥質片麻岩のシュードセクション結果とシュードセクションで求めた、ザクロ石の pyrope (prp) 成分: $X_{prp} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth とザクロ石の grossular (grs) 成分: $X_{grs} = \text{Ca}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth を用いた変成温度圧力解析。黒実線の範囲が D 帯、および E 帯の変成温度圧力領域。低温側の点線の範囲が、Yoshimura and Obata (1995) で報告された、ザクロ石のコアの組成から推定した温度圧力領域。

るため、D 帯および E 帯に産する高度変成岩中のザクロ石の pyrope (prp) 成分に富むザクロ石のリムの化学組成を用いて解析を試みた。D 帯に産するミグマタイト (Metatexite, Diatexite) 中のザクロ石のリムは、 X_{alm} 0.65–0.79, X_{prp} 0.08–0.23, X_{grs} 0.02–0.04, X_{sps} 0.04–0.23 の組成を持つ。この D 帯に産するザクロ石のリムの pyrope (prp) 成分: X_{prp} は、0.08 と低いものも確認されたが、 X_{prp} 0.19–0.23 の組成範囲であった。シュードセクションで求めた、ザクロ石の pyrope (prp) 成分: $X_{prp} = \text{Mg}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth とザクロ石の grossular (grs) 成分: $X_{grs} = \text{Ca}/(\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca} + \text{Mn})$ Isopleth を用いることで、ザクロ石の化学組成から、D 帯に産するミグマタイト (Metatexite, Diatexite) の経験した、変成温度圧力が推定できる。シュードセクション法による解析から、D 帯に産するミグマタイト (Metatexite, Diatexite) の変成温度圧力条件は、およそ 700–780 °C, 5–8 kbar が見積もれる (図6)。

E 帯に産するミグマタイト (Metatexite, Diatexite) に含まれているザクロ石のリムは、 X_{alm} 0.63–0.75, X_{prp} 0.10–0.25, X_{grs} 0.03–0.15, X_{sps} 0.04–0.18 の組成を持つ。この E 帯に産するザクロ石のリムの pyrope (prp) 成分: X_{prp} は、0.10 と低いものも確認されたが、 X_{prp} 0.21–0.25 の組成範囲であった。また、grossular (grs) 成分: X_{grs} は、0.15 と高い組成のものも確認されるが、 X_{grs} 0.02–0.05 の組成範囲であった。シュードセクション法による解析から、E 帯に産するミグマタイト (Metatexite, Diatexite) の変成温度圧力条件は、およそ 750–850 °C, 7–10 kbar が見積もれる (図6)。

九州中部肥後変成帯のD帯およびE帯の変成温度圧力条件は、Obata et al. (1994) や Osanai et al. (1996, 1998, 2001a.), Yoshimura (2004), Miyazaki (2004), 小林 (2016), 小林 (2022) など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Obata et al. (1994) では、720–840°C, 4.5–6.5 kbar, Osanai et al. (1996, 1998, 2001) では、740–820°C, 4.8–6 kbarが報告されている。Yoshimura (2004) は、660–870 °C, 3–7.8 kbarを、Miyazaki (2004) は、D帯相当のGC I より、700–820°C, 3.3–5 kbarを報告している。小林 (2022) は、シュードセクション法の解析から、700–850°C, 4–7 kbarを見積もっている。これらの報告と、本研究のD帯の変成温度圧力解析とは非常に調和的である。

また、地質学的温度圧力計を用いた、E帯の変成温度圧力条件はObata et al. (1994) は、820–920°C, 6–7.5 kbar, Osanai et al. (1996, 1998, 2001) では、800–870°C, 6–7.2 kbarが報告されている。Yoshimura (2004) では、780–930°C, 5–8.8 kbar, Miyazaki (2004) は、E帯相当のGC II より、850°C, 5.7 kbarを報告している。小林 (2016) は800–930°C, 5–9 kbarと見積もっており、小林 (2022) 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)の消失領域は、> 850°C, > 5 kbarを見積もっている。本研究のE帯の変成温度圧力解析は、およそ750–850°C, 7–10 kbarの範囲である。本研究のE帯の変成温度圧力解析は、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、小林 (2022) のシュードセクション法による解析に比べ、より低温低圧条件が見積もられたことになる。今後、この問題については、肥後変成帯に産するザクロ石を含め、その他の黒雲母や堇青石などの鉱物の組成分析値とシュードセクション法による鉱物化学組成推定の比較を行い検討を進める。

さらに、Yoshimura and Obata (1995) は、D帯に産する高度変成岩（ザクロ石—黒雲母—堇青石片麻岩）から顕著な組成累帯構造を示す、ザクロ石を報告している。このザクロ石のコアは微細な包有物が配列した美しいセクト構造を示し、コアの組成は、 $X_{alm} 0.336$, $X_{prp} 0.05$, $X_{grs} 0.281$, $X_{sps} 0.379$ を示し、コアで非常に高いgrossular (grs) 成分を示す(表1)。このザクロ石のコアの組成から、本研究のシュードセクションで求めた、ザクロ石のpyrope (prp) 成分： $X_{prp} = Mg/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isoplethとザクロ石のgrossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isoplethを用いることで、ザクロ石のコア形成時の温度圧力条件は、約300–450°C, 7–10 kbarと見積もれる。このことから、組成累帯構造を示すザクロ石は比較的、低温高圧条件下で生成し、その後高温条件に達したことが推測される(図6)。

7. 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、さらなるシュードセクション法の解析を実施した。

肥後変成帯に産する高度変成岩中のザクロ石の化学組成に関して、シュードセクション法による解析から、pyrope (prp) 成分： $X_{prp} = Mg/(Fe + Mg + Ca + Mn)$, grossular (grs) 成分： $X_{grs} = Ca/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ を求め、ザクロ石のpyrope (prp) 成分とgrossular (grs) 成分のIsoplethを

得た。

シュードセクションで求めた、ザクロ石の pyrope (prp) 成分: $X_{prp} = Mg/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isopleth とザクロ石の grossular (grs) 成分: $X_{grs} = Ca/(Fe + Mg + Ca + Mn)$ Isopleth を用いて、肥後変成帯に産するザクロ石の化学組成から、高温時の変成温度圧力条件の推定を行った。その結果、D帯では、約700–780°C、5–8 kbarが見積もられた。また、E帯では、D帯の温度圧力領域より高温高圧側に分布し、約750–850°C、7–10 kbarが見積もられた。この、解析結果と、D帯、E帯の従来の変成温度圧力見積もりは調和的である。しかし、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、> 850°C、> 5 kbarの範囲に出現しており、シュードセクション法によるザクロ石の化学組成から見積もった変成温度圧力は、約750–850°C、7–10 kbarであり、今回の解析ではE帯に関してより低温が見積もられたことになる。

さらに Yoshimura and Obata (1995) は、D帯に産する高度変成岩 (ザクロ石–黒雲母–堇青石片麻岩) 中のザクロ石から、顕著な組成累帯構造を報告している。このザクロ石のコアの組成を用いて、ザクロ石コア形成時の温度圧力に関して推定したところ、約300–450°C、7–10 kbarが見積もれた。組成累帯構造を示すザクロ石のコアは比較的、低温高圧条件下で生成し、ザクロ石のリムの解析結果から、その後、高温条件に達したと推測される。

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。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。以上の方々、さらに本研究においてお世話になった方々に心より感謝申し上げます。

文献

- Brown, M. (1973) The definition of metatexis, diatexis and migmatite. *Proc. Geol. Ass.*, 84, 371–382.
- de Capitani, C. and Petrakakis, K. (2010). The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95, 1006–1016.
- Hirajima, T. and Banno, S. (1991) Electron-microprobe analysis of rock forming minerals with Kevex-deltaIV (quantum detector) (in Japanese). *Hitachi Scientific Instrument News*, 34, 3418–3428.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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溶融度 名古屋学院大学論集

- 人文・自然科学篇 第52巻 第2号 37-56.
- 小林 記之 (2022) 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 名古屋学院大学論集 医学・健康科学・スポーツ科学篇 第10巻 第1号 33-43.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock forming minerals. *Amer. Mineral.*, v. 68, pp. 277-279.
- 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.
- 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.
- Mori, T. and Kanehira, K. (1984) X-ray energy spectrometry for electron-probe analysis. *Journal of the Geological Society of Japan*, 90, 271-285.
- 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.
- 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).
- 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.
- Obata, M., Yoshimura, Y., Nakagawa, K., Odawara, S. and Osanai, Y. (1994) Crustal anatexis and melt migrations in the Higo metamorphic terrane, west-central Kyushu, Kumamoto, Japan. *Lithos*, v. 32, pp. 135-147
- Osanai, Y., Hamamoto, T., Kamei, A., Owada, M. and 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.
- 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 Kyushu, Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 16, pp. 53-66.
- 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.
- Tsuji, S. (1967) Petrology of the Higo metamorphic Complex in the Kosa-Hamamachi area, Kumamoto prefecture, Kyushu, Japan. *Japan Jour. Geogr.*, 38, pp. 13-25.
- White, R. W., 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. *Journal of Metamorphic Geology* 18, 497-511.
- 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 K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 41-55.
- 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.
- Yamamoto, H. (1962) Pultonic and metamorphic rocks along the Usuki-Yatushiro tectonic line in the western part of central kyushu. *Bull. Fukuoka Gakugei Univ.*, 12, part III, pp. 93-172
- Yoshimura, Y. and Obata, M., (1995), Sector structure and compositional zoning of garnets from the Higo

九州中部肥後変成帯に産する高度変成岩の変成温度圧力見積もり

metamorphic rocks, west-central Kyushu, Japan. *Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, 90, 80-92.
Yoshimura, Y. (2004) Mineral chemistry of the polytic 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.