

関東山地四万十帯ホルンフェルスの 変成鉱物モードと変成流体相の特徴

加賀美英雄・谷口 英嗣*

はじめに

関東山地に分布するホルンフェルスの熱源は一般的に甲府深成岩体と考えられている（山梨県，1970；Yuasa, 1976）。これまでに甲府深成岩体の一つの徳和花崗閃緑岩（Shimizu, 1986）に接する四万十帯を，多摩川上流の全支流（北から一之瀬川，柳沢川，泉水谷，小菅川および南秋川）について調査し変成分帯を行った（加賀美・谷口，1998，1999，2000，2001，2002）。その結果，一之瀬川では，徳和花崗閃緑岩との接触部からザクロ石帯（Grt），堇青石帯（Crd），黒雲母1帯（Bt 1）が識別された（加賀美・谷口，1999）。柳沢川では，花崗閃緑岩との接触部からザクロ石帯（Grt），堇青石帯（Crd），黒雲母1帯（Bt 1），黒雲母2帯（Bt 2），緑泥石帯（Chl）を分帯した（加賀美・谷口，1998，2000）。泉水谷では，Grt，Crd，Bt 1，Bt 2，の各帯に分帯した（加賀美・谷口，2001）。小菅川では，Grt，Crd，Bt 1，Bt 2，Bt 3，Chlの各帯を分帯した（加賀美・谷口，2002）。また，南秋川では，Grt，Crd，Bt 1の各帯を識別した（加賀美・谷口，準備中）。調査を行った地域の変成分帯とサンプル採集地点を示す（図1）。

なお，関連する地質図として，村田ほか（1986），酒井（1987），山梨県（1970）なども参照した。それらによると，本地域では四万十層群の走向線が花崗閃緑岩にほぼ垂直に接しており，北側ほど下位の地層になる分布をしている。幅3 km位のホルンフェルス帯を横断する支流に沿うサンプリング・ラインに限れば，地層は同一層準であり岩相変化は無視できる利点がある。しかし，支流が違えば層準が異なり，一之瀬川と柳沢川では小仏層群が分布し，泉水谷と小菅川では三倉層群が分布する。

筆者らはホルンフェルス中の石英のカソードルミネッセンス画像を検討する過程で，石英のモード（鉱物の容積%）をいかに正確に表現するかという問題に直面した。以来，試行錯誤を経た後に，EPMA分析における鉱物同定とモードの試案を得た（加賀美・谷口，2002）。また，その成果を踏まえてEPMA線分析による積算鉱物分析の試みを行った（加賀美・谷口，2003）。従来，火山ガラスのように均一成分のものについてはEPMA全岩分析の精度の良い報告があるが（長

* 駒沢大学高等学校

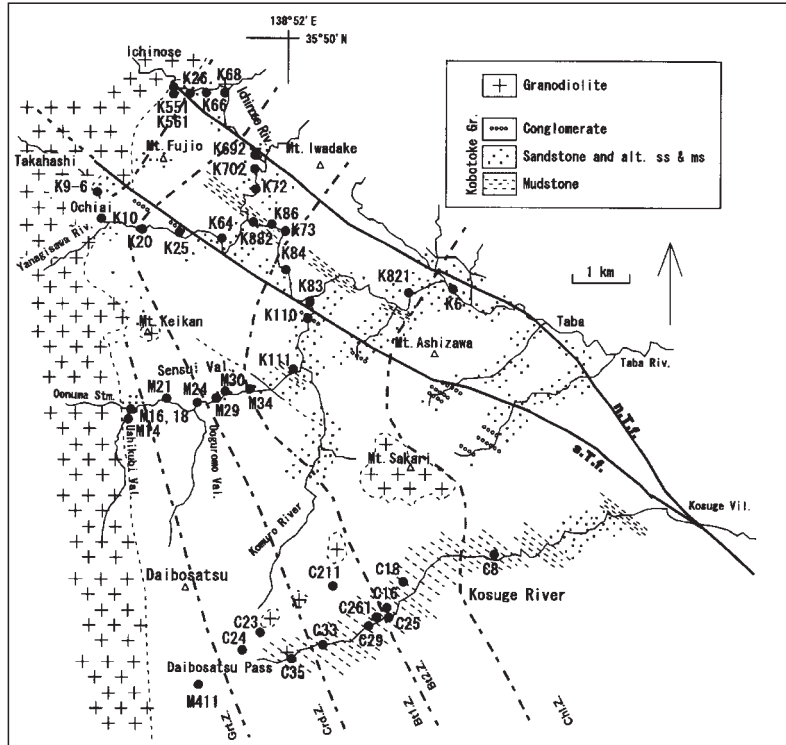


図1 塩山市一之瀬川～北都留郡小菅川間のホルンフェルス・サンプル採集点，
変成分帯と地質概念図（村田ら，1986をもとに改変）

橋ら，2003），岩石のように不均質なものについては問題があった。平岡（1996）は Ferry（1988）の方法により，EPMAによって得られた各鉱物の平均組成値に主成分鉱物9種の重量比を掛けて算出した鉱物化学組成値を得ている。

本論文は，約10,000点（51地点×200分析）のEPMA測定，主として線分析（ライン・アナリシス）法を行った結果の統計的な考察である。その結果，石英のモードを正確に記載することによって，変成に関与している石英の増減が明確になったこと，かつ，線分析測定した鉱物集合体の積算化学組成を用いて，局所的に物質移動が認められる組成変化が明らかになった。

この方法の精度などに関しては，今後において議論・検討を進めなければならないが，速報として何が明らかになったかを記して，ここにご批判を受けることにする。

1. 鉱物同定とモード

筆者らはこれまでEPMA分析結果の各鉱物の分類・検証には，Deer et al.（1982）を参照し分析された値が通常のスโตイキオメトリーとなるものの，元素のwt%の合計値が100wt%に満たないものや，例えば石英や長石の場合に100wt%に近いものでもFeなどの多量の混入が認め

られる分析値は無用なものとして排除してきた。しかし、著者らは EPMA 線分析で出される多数の分析値のうち、石英のモードは鉱物共生を判定する上での重要な基準であると考えていた。顕微鏡観察および組成像観察で、本地域に分布する石英粒の周縁部にはいわゆるダスティーズゾーンの存在が確認されたことから、分析値が通常のストイキオメトリーとなる純粋な石英の他、それに合わないものでも、不純物が存在する石英や 2 鉱物の境界での混合と見られる石英などが存在し、それらを「不純物を含む石英類（以下 Im. 石英類と表記）」としてモードに加えることにした。同様の考えで他の鉱物についても、それぞれの不純物を含む鉱物として識別し、分析値を生かすことにした。不純物を含む鉱物の基準は wt% の合計値が純粋鉱物の $\pm 10\%$ 以内に入るものとした。なお、純粋な各鉱物の特徴は 2-1, 2-2, 2-3 の各項の最初に詳述する。その結果、純粋な石英に加えて、Im. 石英類を加算して、全石英類をリスト化するモードを得ることが可能となり、他の全鉱物についても同様にモードが詳細に決定できるようになった。

以下において、石英類、長石類、その他の変成鉱物類のモードについて具体的に検討する。なお、この 3 つのグループのモードを加算したのが全岩に当たる。従って、本文で取り上げるモードの単位は、各種鉱物を全鉱物積算の母集団で割った % であり、全岩に対する割合である。

2. 各鉱物の特徴と変成作用

2-1 石英類の化学組成とモード

純粋な石英とは SiO_2 の wt% の合計が 98~103 wt% の範囲にあり、Si 以外の各元素は O (Oxygen)=8 のとき 0.1 afu を超えないものとする。Si 以外の元素で、afu 値が 0.1 afu を超えたものを Im. 石英類と呼ぶ。

この定義に入らない、いわゆる Im. 石英類は Al_2O_3 を 1~6% 含むことから、Im. 石英類を仮に分類することを試みた（加賀美・谷口，2002）。その大部分は長石類不純物を含んでいるとみなし、分析値の $\text{Ca}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ の値が 10% 以下のものをアルバイト (Ab と表記)、10% 以上を示すものを斜長石 (Pl) とした。なお、斜長石のうち上記の値が 10~30% に入るものをオリゴクレスと呼ぶ。また、 $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ の値が 80% を越えるものを正長石（実際には微斜長石であるが、Or と表記）、10~80% の範囲に入るものを便宜的にカリ長石（実際にはアルカリ長石であるが、Kfs と表記）とした。なお、 $\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Na}+\text{K})$ の値が 90% 以上のものをアルバイトとした。

ことわるまでもないが、これらの表記は元来長石類自体の分類に使われている定義であるが、Im. 石英類の細分にそのまま利用したので、実際に使う場合には、Im.Pl というように Im. の付いた表示にした。

次に石英に雲母類などの不純物が含まれる場合であるが、FeO 含有量が 1.0 wt% より大きく、

K₂O を含むものを Im.Mi (不純物を含む雲母類), それ以外を仮に Im.Ot (不純物を含むその他の変成鉱物類) とした (表 1-a)。

表 1-a 石英類のモード (一之瀬川)

表中の略号は次の通り。Qz 石英, Pl 斜長石, Kf カリ長石, Ab アルバイト, Or 微斜長石

Zone	Loc	Nor Qz	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Im.Mi	Im.Ot	Im.Sum	Whole Qz	Imp.Ratio
Grt	K561	22.8	1.2	2.9	0	1.2	0.6	0	5.8	28.6	20.4
	K551	45.8	4.7	2	0	2.2	2.7	0	11.5	57.3	20.1
	K26	15.6	3.6	0	0	0	0	1.8	5.4	21	25.7
Crd	K66	30	0.9	1.4	0	0.9	0	0	3.2	33.2	10
	K68	25.9	1.7	0	0	1.7	1.3	0	4.7	30.6	15.4
	K692	36.6	5.5	0.5	0.5	0	2.2	0	8.8	45.4	19.5
Bt 1	K702	34.5	3.8	0.8	0.4	2.9	1.7	0	9.5	44	21.6
	K72	8.8	13.2	8	0	2.2	4.4	0	27.9	36.7	76
	K73	22.8	3.3	1.9	0.5	6.3	1.4	0	13.5	36.3	37.3

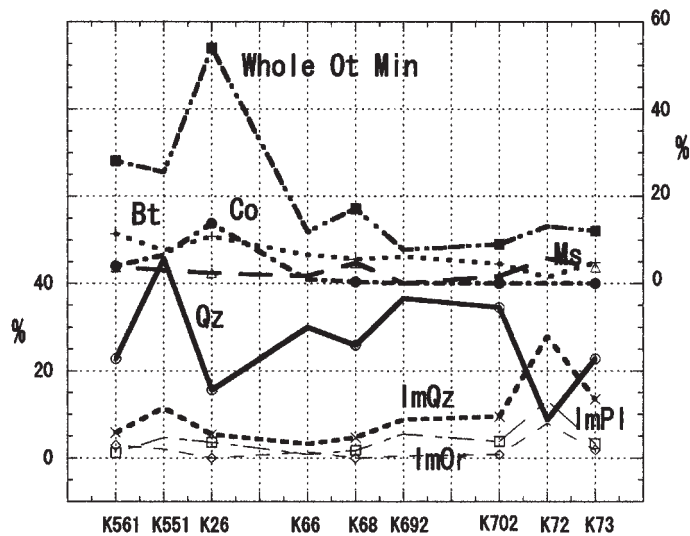


図 2-a 石英類とその他の変成鉱物類のモード (一之瀬川)

図中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Co 堇青石, Ms 白雲母, Qz 石英, ImPl 不純石英 Pl, ImOr 不純石英 Or, ImQz 全不純石英, Whole Ot Min 全その他の変成鉱物

これから述べる石英モードの表 1 において, 1 列目は変成分帯, 2 列目は産地番号, 3 列目は純粋な石英のモードを示す。4 から 9 列目までは, Im. 石英類の例で, 10 列目にそれらの小計が示されている。3 列目と 10 列目の合計が全石英類として 11 列目に示されている。12 列目は Im. 石英類の全石英類に対する割合 (不純率; 以下 Im.Ratio と表記) である。

まず, 一之瀬川の石英モードについて検討すると (表 1-a, 図 2-a), 3 列目の純粋な石英は, Bt 1 帯の K702, Crd 帯の K692 と Grt 帯の K551 において多く, Bt 1 帯の K72, Grt 帯の K26 において少ない。Bt 1 帯の K72 と K73 に Im. 石英類が多く, 12 列目の Im.Ratio が大きいのに, 以後の帯で小さい値になるのがこの地域の特徴である。

表 1-b 石英類のモード (柳沢川)

表中の略号は次の通り。Qz 石英, Pl 斜長石, Kf カリ長石, Ab アルバイト, Or 微斜長石

Zone	Loc	Nor Qz	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Im.Mi	Im.Ot	Im.Sum	Whole Qz	Imp.Ratio
Grt	K9-6	18	7	1	0	0	7	0	15	33	45
Crd	K10	25	0	1	0	1	1	0	3	28	12
Bt 1	K20	12	5	2	0	3	0	0	10	22	45
	K25	20	3	0	0	4	4	0	11	31	35
	K64	25	6	2	0	8	4	0	20	45	44
	K882	5	3	11	1	9	10	0	34	39	88
(MnG)	K73	27	8	2	0	8	4	0	22	49	46
	K86	4	9	3	1	1	7	0	21	25	83
Bt 2	K84	38	9	2	2	3	2	0	17	55	32
	K821	24	1	1	1	4	1	0	8	32	24
Chl	K6	32	0	5	5	11	1	0	22	54	40

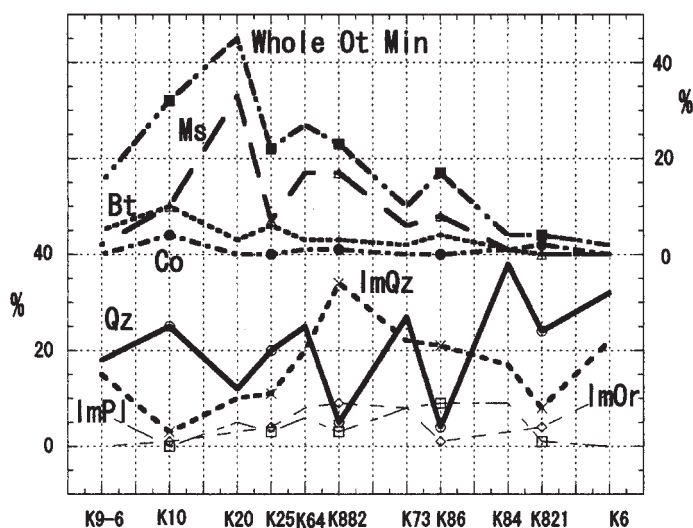


図 2-b 石英類とその他の変成鉱物類のモード (柳沢川)

図中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Co 堇青石, Ms 白雲母, Qz 石英, ImPl 不純石英 Pl, ImOr 不純石英 Or, ImQz 全不純石英, Whole Ot Min 全その他の変成鉱物

次に、柳沢川の石英モードを検討すると (表 1-b, 図 2-b), 3 列目の純粋な石英のモードが, Chl~Bt 2 帯の 32~38% から Crd~Grt 帯の 25~18% に減少することが示されている。これは 11 列目の全石英類でも Chl~Bt 2 帯の 54~55% から, Crd~Grt 帯での 28~33% に減少することと同様である。なお、注目すべきは Bt 1 帯の K86~K882 において、Im.Ratio が急増し 83~88% と高くなっている点である。この地域では原岩の岩相の変化はないので、このような値の変化は説明がつかない。

泉水谷の石英モードを検討すると (表 1-c, 図 2-c), 11 列目の全石英類も、3 列目の純粋の石英も、10 列目の Im. 石英類も共に、Bt 2 帯で多い。全石英類のモードは Bt 2 帯で全岩の 38~61% も占めていたが、ホルンフェルスの変成が進むと共に値は激減し、Grt 帯で 0% になる。

表 1-c 石英類のモード (泉水谷)

表中の略号は次の通り。Qz 石英, Pl 斜長石, Kf カリ長石, Ab アルバイト, Or 微斜長石

Zone	Loc	Nor Qz	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Im.Mi	Im.Ot	Im.Sum	Whole Qz	Imp.Ratio
Grt	M14	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	M18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	M15	7	2	0	0	1	2	0	5	12	40
	M16	8	2	0	0	6	3	0	11	19	57
Crd	M21	5	1	2	0	2	3	0	9	14	65
	M23	22	1	1	0	1	0	0	3	25	13
	M24	14	2	4	0	2	1	0	9	23	41
Bt 1	M29	1	1	2	0	0	0	0	3	4	67
	M30	5	2	0	0	2	2	0	6	11	55
Bt 2	M34	17	6	7	0	7	7	0	27	44	62
	K111	2	5	7	1	2	22	0	37	39	93
	K110	25	1	15	2	8	10	0	36	61	59
	K83	18	8	7	0	2	2	0	20	38	52

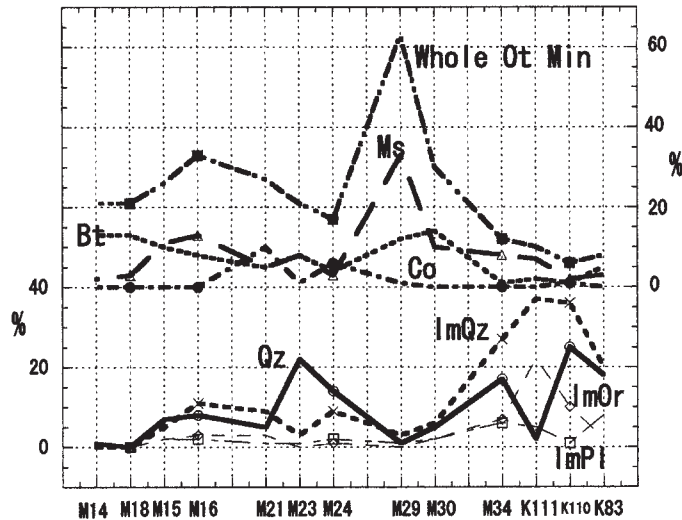


図 2-c 石英類とその他の変成鉱物類のモード (泉水谷)

図中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Co 堇青石, Ms 白雲母, Qz 石英, ImPl 不純石英 Pl, ImOr 不純石英 Or, ImQz 全不純石英, Whole Ot Min 全その他の変成鉱物

小菅川の石英モードを検討すると (表 1-d, 図 2-d), Bt 2 帯の C 261 から Crd 帯の C23 にかけて純粋の石英は 20% 以上と多産する。特に, Bt 1 帯の C 33 から Crd 帯の C23 は Im. 石英類と比べて純粋な石英の方が多くなる。これに対して Im. 石英類は Bt 3 帯の C18 から Bt 1 帯の C29 にかけて著しく多いのに Bt 1 帯以上では少なくなることが, 10 列目から読みとれる。また, Grt 帯に達すると全石英類が 3% と激減している。

これらの変化をまとめると, ホルンフェルスの変成が進むと純粋の石英が Im. 石英類に対して増え, かつ全石英類は減少している。また, 一之瀬川地域のように砂岩卓越域では純粋の石英は

表 1-d 石英類のモード (小菅川)

表中の略号は次の通り。Qz 石英, Pl 斜長石, Kf カリ長石, Ab アルバイト, Or 微斜長石

Zone	Loc	Nor Qz	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Im.Mi	Im.Ot	Im.Sum	Whole Qz	Imp.Ratio
Grt	M411	1	1	0	0	0	0	1	2	3	63
Crd	C24	10	0	2	0	1	0	0	3	13	21
	C23	25	0	2	0	0	3	0	5	30	17
	C35	4	1	1	0	1	2	0	5	9	58
Bt 1	C33	25	1	0	0	2	1	0	5	30	14
	C211	7	1	3	0	4	1	0	9	16	55
	C29	20	1	8	1	4	6	1	21	41	51
Bt 2	C261	24	4	8	3	9	10	1	35	59	59
	C25	7	0	6	1	2	8	0	17	24	72
Bt 3	C16	10	0	6	1	6	14	0	27	37	73
	C18	5	0	2	0	3	11	0	16	21	76
Chl	C8	2	0	3	0	2	4	0	9	11	84

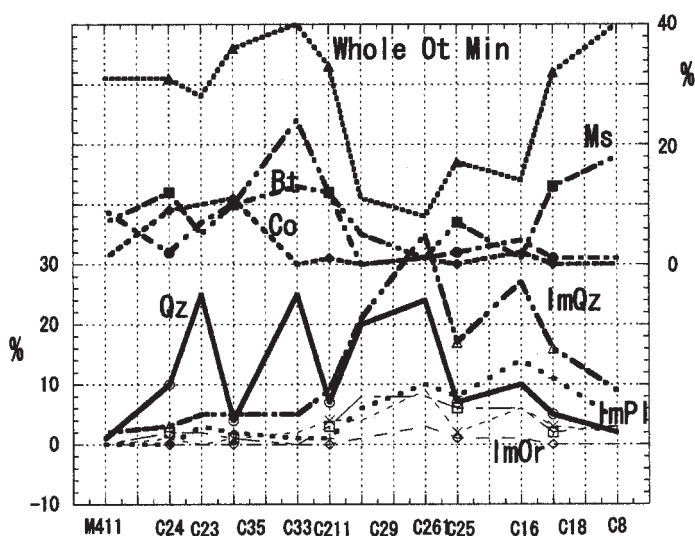


図 2-d 石英類とその他の変成鉱物類のモード (小菅川)

図中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Co 堇青石, Ms 白雲母, Qz 石英, ImPl 不純石英 Pl, ImOr 不純石英 Or, ImQz 全不純石英, Whole Ot Min 全その他の変成鉱物

量的に変わらないのに、変成が進むと共に Im. 石英類は減少する傾向が見られる。

2-2 長石類の化学組成とモード

長石類のモードを見るため表 2 を作成した。石英類と同じ考えで、長石のストイキオメトリーに合致する純粋な長石類と「不純物を含む長石類 (以下 Im. 長石類と表記)」を区別し、各々の割合を示している。純粋な長石類とは各元素の wt% の合計が 97~103 wt% の範囲にあり、O(Oxygen) = 8 としたとき、各元素の afu 値の合計が 5 ± 0.1 (afu) で、Si, Al, Ca, Na, K 以外の各元素の afu 値がそれぞれ 0.1 (afu) を超えないものとする。この条件以外で、各元素の afu 値の合計が 5 ± 0.3 (afu) で、FeO (MnO, MgO) が 1.0 wt% を超えるものは Im. 長石類と呼ぶ。

表 2-a 長石類のモード (一之瀬川)

Zone	Loc	Pl	Kf	Ab	Or	Sum(%)	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Sum(%)	Whole Fel	Imp.Ratio
Grt	K561	21	16	0	0.5	37.7	2.9	1.4	0.8	0.3	5.5	43.2	12.8
	K551	6.5	4	0	0	10.5	3	2	0	1	6	16.5	36.3
	K26	22.2	0	0	0	22.2	1.8	0	0	0.6	2.4	24.6	9.7
Crd	K66	23.8	20.9	3.3	2.3	50.4	2.8	0.9	0.4	0	4.2	54.6	7.8
	K68	22	7.8	1.3	10.8	41.9	5.2	1.3	0	3.4	10	51.9	19.1
	K692	35	0.5	1.1	0	36.6	8.8	0	0	1.1	9.9	46.5	21.4
Bt 1	K702	19.5	1.7	0.4	16.6	38.3	3.8	1.7	0	2.9	8.3	46.6	17.8
	K72	22.1	0.7	0	1.4	24.2	14.7	8	0	2.9	25.7	49.9	52.2
	K73	22.8	2.9	8.2	5.3	39.3	5.3	3.3	0.5	2.9	12.1	51.4	23.5

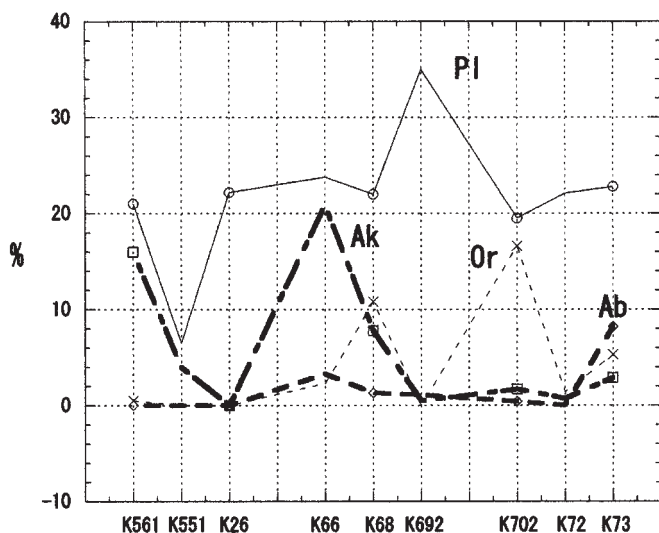


図 3-a 長石類のモード (一之瀬川)

図中の略号は次の通り。Ab アルバイト、Ak カリ長石、Or 微斜長石、Pl 斜長石、Or+ImOr 微斜長石+不純微斜長石

なお、この定義では鉄などが固溶体中に取り込まれる現象は排除されていない。

表 2 の 1 列目は変成帯区分であり、2 列目は産地番号である。3～6 列目は純粋な長石類で、斜長石 (Pl)、カリ長石 (Kfs)、アルバイト (Ab)、微斜長石 (Or) と配列している。7 列目はそれらの小計である。8～11 列目は Im. 長石類で、Im.Pl、Im.Kfs、Im.Ab、Im.Or であり、12 列目はそれらの小計である。13 列目は全長石類の割合を示し、14 列目は Im. 長石類の割合 (Im.Ratio) を示している。

まず、石英と同じように北の一之瀬川から検討する (表 2-a, 図 3-a)。表の 7 列目の純粋な長石類の小計や、13 列目の全長石類の合計には際だった変動は見られないが、それらをプロットした図 3-a を見ると、個々の組成ではいくつかの特徴を挙げる事が出来る。まず、Bt 1 帯の K73 において Ab が若干多いこと、同帯の最上部の K702 において Or が多くなることである。Crd 帯の K692 の位置は他の谷では Or が多いところに当たるのに、ここでは Pl が 35% と激増

表 2-b 長石類のモード (柳沢川)

Zone	Loc	Pl	Kf	Ab	Or	Sum(%)	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Sum(%)	Whole Fel	Imp.Ratio
Grt	K9-6	29	2	0	2	33	9	5	0	3	17	50	34
Crd	K10	21	11	2	1	35	2	0	0	1	3	38	9
Bt 1	K20	19	1	0	1	21	2	1	1	7	11	32	35
	K25	22	2	1	9	34	3	4	0	6	13	47	28
	K64	8	1	1	3	13	3	2	0	11	16	29	55
	K882	4	3	1	4	12	1	12	1	13	28	40	71
(MnG)	K73	17	5	4	6	31	4	2	0	2	8	39	20
	K86	14	1	6	0	21	17	17	1	1	36	57	63
Bt 2	K84	16	3	15	1	35	6	1	0	0	7	42	16
	K821	9	9	25	15	57	1	1	3	3	8	65	12
Chl	K6	3	10	8	7	28	3	8	3	2	16	44	36

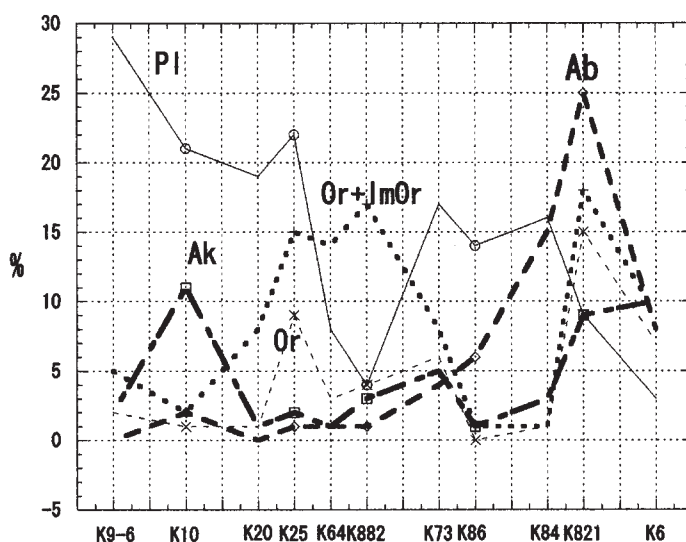


図 3-b 長石類のモード (柳沢川)

図中の略号は次の通り。Ab アルバイト, Ak カリ長石, Or 微斜長石, Pl 斜長石, Or+ImOr 微斜長石+不純微斜長石

している。Crd 帯の K66 では Kfs が増加してピークをつくる。Pl は変動するが Grt 帯で 21~22 %台の値を保持している。

次に、柳沢川の長石類モードでは (表 2-b), 13 列目の全長石類を見ると大きな変化は見られないが、3 列目の Pl の動向に特徴が見られる。Chl 帯の K6 や Bt 2 帯の K821 では 3~9 %であるが、Crd 帯の K10 や Grt 帯の K9-6 では 21~29%に増加している。明らかにオリゴクレス斜長石化が進んでいる。また、図 3-b を見ると、Bt 2 帯の K 821 で Ab が 25%とピークを作っている。Bt 1 帯の K882 で Or+Im.Or が 17%とピークを作る。Crd 帯の K10 で Kfs が 11%と多くなり、Grt 帯の K9-6 で Pl が 29%とそれぞれの変成分帯毎に異種の長石類が多くなる。

泉水谷の全長石類のモードは (表 2-c, 図 3-c), Bt 2 帯の 30~60%台から Grt 帯の 40~70%台へと増加し、3 列目の Pl でも Bt 2 帯での 5~6 %から Grt 帯での 30~60%へと増加している。

表 2-c 長石類のモード (泉水谷)

Zone	Loc	Pl	Kf	Ab	Or	Sum(%)	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Sum(%)	Whole Fel	Imp.Ratio
Grt	M14	33	25	1	1	60	10	7	0	2	19	79	24
	M18	66	3	2	2	73	6	0	0	0	6	79	8
	M15	34	9	0	9	52	5	1	0	4	10	62	16
	M16	26	9	2	1	38	4	2	0	4	10	48	20
Crd	M21	14	30	1	1	46	3	8	0	3	13	59	23
	M23	21	10	1	5	37	8	5	0	5	17	54	31
	M24	28	20	1	0	49	4	6	0	2	12	61	19
Bt 1	M29	9	3	1	0	14	12	5	0	2	19	33	57
	M30	19	6	2	7	35	10	11	0	4	25	60	42
Bt 2	M34	16	3	5	0	25	4	6	0	9	19	44	43
	K111	6	0	7	0	13	12	32	0	9	51	64	81
	K110	5	6	3	6	20	3	7	1	3	13	33	39
	K83	21	4	10	0	35	6	11	0	3	20	55	35

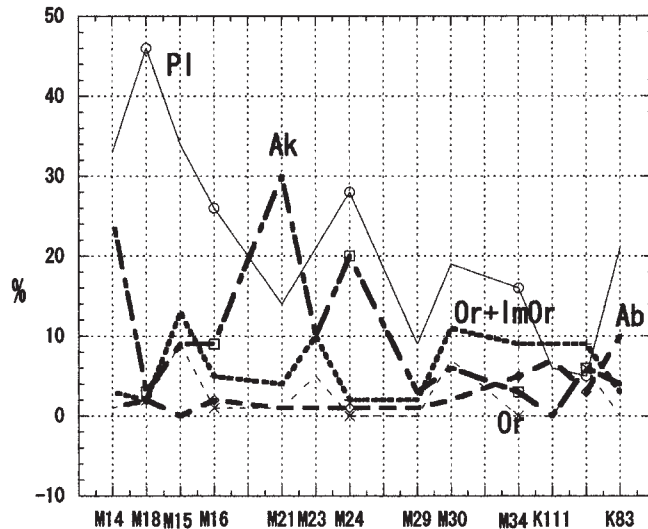


図 3-c 長石類のモード (泉水谷)

図中の略号は次の通り。Ab アルバイト、Ak カリ長石、Or 微斜長石、Pl 斜長石、Or+ImOr 微斜長石+不純微斜長石

これを各鉱物種別に見ると、Bt 2 帯の K 83 では Ab が 10% とピークをつくり、Bt 1 帯の M30 では Or+Im.Or が 11% とピークをつくる。Crd 帯の M21 で Kfs が 30% のピークとなり、Grt 帯の M18 で Pl が 66% と大ピークを作る。この支流でもそれぞれの変成分帯毎に優勢となる長石類が異なる。

小菅川の長石類のモードを検討すると (表 2-d, 図 3-d), Im. 長石類は Chl 帯の C8 や Bt 3 帯の C18 では 34~64% であり、Crd 帯の C24 や Grt 帯の M411 では 9~16% と全体的に減少する。これに対して、純粹の長石類は C8~C18 では 10~11% であるのに、C24~M411 のそれは 47~48% と増加している。その変化を、Chl 帯の方から見てみると、同帯では Im. 長石類が圧倒的に多く、Im.Or (37%) や Im.Kfs (23%) の合計が全岩の 64% に達している。この傾向は次

表 2-d 長石類のモード (小菅川)

Zone	Loc	Pl	Kf	Ab	Or	Sum(%)	Im.Pl	Im.Kf	Im.Ab	Im.Or	Sum(%)	Whole Fel	Imp.Ratio
Grt	M411	48	0	0	0	48	15	1	0	0	16	64	25
Crd	C24	22	18	5	2	47	2	4	1	2	9	56	17
	C23	20	13	1	1	35	4	2	0	0.4	6	41	16
	C35	12	29	4	4	49	1	3	0	1	5	54	10
Bt 1	C33	19	2	1	0	22	4	2	0	0	6	28	23
	C211	15	6	5	9	35	9	15	1	16	41	76	32
	C29	2	8	5	9	24	2	5	12	5	24	48	49
Bt 2	C261	7	5	12	3	27	2	3	1	3	9	36	25
	C25	8	9	7	5	29	5	15	3	7	30	59	50
Bt 3	C16	9	2	8	1	20	3	16	1	8	28	48	58
	C18	2	0.5	5	3	11		14	1	19	34	45	78
Chl	C8	2	3	4	2	11	1	23	3	37	64	75	79

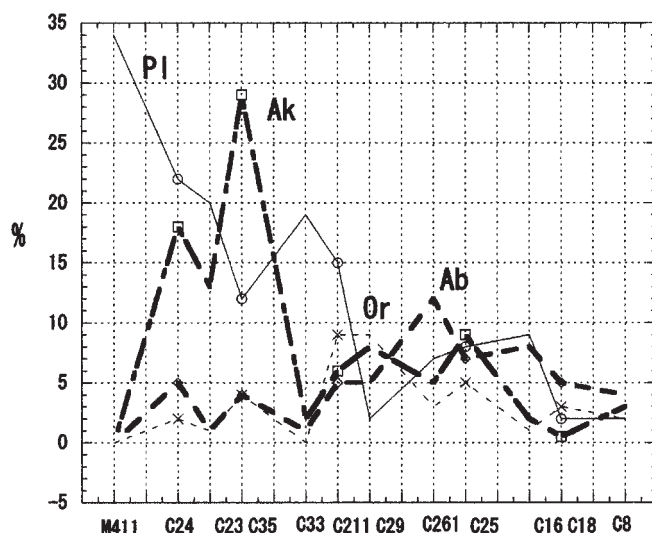


図 3-d 長石類のモード (小菅川)

図中の略号は次の通り。Ab アルバイト、Ak カリ長石、Or 微斜長石、Pl 斜長石、Or+ImOr 微斜長石+不純微斜長石

の Bt 3 帯でも継続するが、C16 になると、やや Ab と Pl が増加する傾向が見られる。Bt 2 帯では Ab, Pl, Kfs が多く、特に C261 では Ab が 12% とピークを作る。Bt 1 帯では一転して Or が多くなり、Im.Or も含めると C29 で 14%、C211 で 25% に達する。Crd 帯では、C35 に見られるように Kfs が 29% とピークを作る。Grt 帯になると M411 では Pl のみに変化し、48% と激増する。この支流でも変成分帯毎に優勢となる長石類が異なる。

長石類のモードの特徴：以上述べた各分帯に産出する長石類には、共通する特徴が見られた。一之瀬川では、Bt 1 帯で Or がピークを、Crd 帯で Kfs がピークを、そして Grt 帯では Pl がピークをつかった。柳沢川では、Bt 2 帯で Ab が 15~25% と最多種である。Bt 1 帯で Or では 9% であるが、Or+Im.Or とすると最多種となる。Crd 帯で Kfs が、そして Grt 帯で Pl が 29% と最

多である。泉水谷では、Bt 2 帯で Ab が 5～10%，Bt 1 帯で Or+Im.Or が 10%と多くなっている。Crd 帯で Kfs が 20～30%と最多である。Grt 帯で Pl が 26～66%と最多で、全地域を含めても最高である。小菅川では、Bt 2 帯で Ab が 8～12%，Bt 1 帯で Or が 9%，Crd 帯で Kfs が 29%と多く、Grt 帯で Pl が 20～48%となっている。

2-3 その他の変成鉱物類の化学組成とモード

その他全ての変成鉱物類の鉱物種としては黒雲母、白雲母、緑泥石、堇青石、ザクロ石、燐灰石、チタン鉄鉱、磁鉄鉱、方解石、およびその不純物を含む鉱物となっている。ここでも石英や長石類と同じ考えで、各鉱物のストイキオメトリーに合致する純粋な変成鉱物類と「不純物を含む変成鉱物類（以下 Im. その他の変成鉱物類と表記）」を区別し、各々の割合を示している。純粋な黒雲母は各元素の wt%の合計が 94～97 wt%の範囲にあり、各元素の afu 値の合計が 16 ± 0.1 afu で、構成元素以外の元素の afu 値が 0.1(afu)を超えないもので、 K_2O が 5.0 wt%以上、 SiO_2 が 30%代にあるものとする。この条件以外で、各元素の afu 値の合計が 16 ± 0.3 afu 以内であるものは不純物を含む黒雲母と呼ぶ。また、純粋な堇青石は元素の wt%の合計が 96～100%の範囲にあり、 K_2O が 1.0%以下で、 SiO_2 が 40%台にあるものとした。

まず、一之瀬川では（表 3-a, 図 1-a）、全‘その他の変成鉱物類’の値（表中の Whole%）が Bt 1 帯で 9～13%，Crd 帯で 7～17%，Grt 帯で 25～54%となっている。特に Grt 帯で黒雲母と堇青石が増えているのが特徴である。

表 3-a その他の変成鉱物類のモード（一之瀬川）

表中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Ms 白雲母, Ch 緑泥石, Co 堇青石, Ga ザクロ石, Ap アパタイト, Ti チタン鉄鉱, Ma 磁鉄鉱, Ca 方解石

Zone	Grt			Crd			Bt 1		
	K561	K551	K26	K66	K68	K692	K702	K72	K73
Bt	11.4	7.5	10.8	6.6	5.6	6.1	4.5	1.4	4.8
Ms	3.8	3	2.4	1.8	4.7	0	1.7	5.8	3.8
Ch	0.3	0	2.4	0	0	1.1	0	0.7	0
Co	4.1	6.5	13.8	0.9	0.4	0	0	0	0
Ga	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Ap	0	0	9.6	0	0	0	0	0	0.5
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ma	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	19.5	18.1	39.1	9.5	10.8	7.2	6.2	8	9.2
Im.Bt	0.6	3.7	3	0.9	3	0	2.5	0.7	1
Im.Ms	0.6	1	0.6	0.4	0.4	0	0.4	4.4	1.4
Im.Ch	0.6	0	0	0	1.3	0	1	0	0
Im.Co	5.3	1.5	0.6	0.9	1.7	0	0	0	0
Im.Ga	1.7	0.5	0.6	0	0	0	0	0	0
Sum	8.7	7.5	15	2.3	6.4	0.5	2.9	5.1	2.9
Whole %	28.2	25.6	54	11.8	17.2	7.7	9.1	13.1	12.1
Imp Ratio	30.9	29.4	27.7	20	37.5	7.1	31.8	38.8	24

表 3-b その他の変成鉱物類のモード (柳沢川)

表中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Ms 白雲母, Ch 緑泥石, Co 堇青石, Ga ザクロ石, Ap アバタイト, Ti チタン鉄鉱, Ma 磁鉄鉱, Ca 方解石

Zone	Grt	Crd	Bt 1				(MnG)		Bt 2		Chl
Loc	K9-6	K10	K20	K25	K64	K882	K73	K86	K84	K82	K6
Bt	5	10	3	6	3	3	2	4	1	0	0
Ms	2	10	33	7	17	17	6	8	1	0	0
Ch	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0
Co	0	4	0	0	0.5	0.5	0	0	1	2	0
Ga	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Ap	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Ti	0	0	0	1	0.5	0.5	0	1	0	0	0
Ma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	10	24	37	15	22	21	9	15	3	3	0
Im.Bt	4	2	1	2	1	1	0.5	0	0	0	0
Im.Ms	1	4	7	5	4	1	0.5	2	1	0	1
Im.Ch	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
Im.Co	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
Im.Ga	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	5	8	8	7	5	2	1	2	1	1	2
Whole %	15	32	45	22	27	23	10	17	4	4	2
Imp Ratio	33	25	18	31	19	7	13	12	17	33	0

次の柳沢川では(表 3-b, 図 1-b), 全 ‘その他の変成鉱物類’ の値が Bt 2 帯で 4%, Bt 1 帯で 22~45%, Crd 帯で 32%, Grt 帯で 15%となっている。Bt 1 帯の K20 (サンプル番号であるので, 下線を付ける) において白雲母を 33%も含み全 ‘その他の変成鉱物類’ が 45%となっている。K20 を除くと, Bt 1 帯の全 ‘その他の変成鉱物類’ は 22~27%となり, Crd 帯よりは小さくなる。Crd 帯は, 黒雲母, 白雲母, 堇青石のモードが増加して全 ‘その他の変成鉱物類’ の値が増えている。一方, Grt 帯では全 ‘その他の変成鉱物類’ が Crd 帯より少ない。

泉水谷では全 ‘その他の変成鉱物類’ の値は (表 3-c, 図 1-c), Bt 2 帯で 6~12%, Bt 1 帯で 30~63%, Crd 帯で 17~27%, Grt 帯で 21~33%となっている。Bt 1 帯の M29 において白雲母が 33%と多くなっている。Crd 帯で多いのは堇青石 6~10%, 白雲母 3~8%, 黒雲母 4~8% などである。また, Grt 帯で多いのは, 黒雲母 8~13%, 白雲母 2~13%などである。

小菅川では全 ‘その他の変成鉱物類’ の値は (表 3-d, 図 1-d), Bt 3 帯で 14~32%に達する。Bt 2 帯で 8~17%となる。特に C261 で 8%と最低になっている。Bt 1 帯では全 ‘その他の変成鉱物類’ は 11~40%の値を示す。特に, C33 は 40%と多くなっているが, これは白雲母と黒雲母の形成による。Crd 帯では 28~36%と多くなるが, これは堇青石, 白雲母, 黒雲母の形成による。Grt 帯では 31%となるが, これは黒雲母, 白雲母の形成による。

以上検討してきたように, 当地のホルンフェルスでは変成が進むにつれて, 全 ‘その他の変成鉱物類’ の値は Bt 2 帯の数%~10%台から, Bt 1 帯の 22~33%に一気に増加する。Crd 帯では

表 3-c その他の変成鉱物類のモード (泉水谷)

表中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Ms 白雲母, Ch 緑泥石, Co 堇青石, Ga ザクロ石, Ap アパタイト, Ti チタン鉄鉱, Ma 磁鉄鉱, Ca 方解石

Zone	Grt				Crd			Bt 1		Bt 2			
	M14	M18	M15	M16	M21	M23	M24	M29	M30	M34	K111	K110	K83
Bt	13	13	10	8	5	8	4	12	14	0.5	1	0.4	5
Ms	2	3	11	13	5	8	3	33	10	8	7	2	3
Ch	0	0	2	3	0	1	0	0.5	0	0	0	1	0
Co	0	0	0	0	10	0.6	6	0.5	0	0	0	0.4	0
Ga	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	1	0	0
Ap	1	1	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	0	0
Ti	0	0	0	0	1	0	0.5	0	0	0	0	0	0
Ma	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0.4	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sum	16	17	23	24	22	19	14	46	24	9	9	4	8
Im.Bt	2	3	1	5	2	1	0.5	7	3	0.5	0	0	0
Im.Ms	1	0.5	2	3	3	0.5	2	8	3	2	1	1	0
Im.Ch	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0	0	0	0	0
Im.Co	1	0.5	0	0.5	0	0	0	1	0	0.5	0	0.6	0
Im.Ga	1	0	0	0.5	0	0.5	0	0	0	0	0	0.3	0
Sum	5	4	3	9	5	2	3	17	6	3	1	2	0
Whole %	21	21	26	33	27	21	17	63	30	12	10	6	8
Imp Ratio	23	20	13	27	17	12	16	27	19	22	7	38	0

表 3-d その他の変成鉱物類のモード (小菅川)

表中の略号は次の通り。Bt 黒雲母, Ms 白雲母, Ch 緑泥石, Co 堇青石, Ga ザクロ石, Ap アパタイト, Ti チタン鉄鉱, Ma 磁鉄鉱, Ca 方解石

Zone	Grt	Crd			Bt 1			Bt 2		Bt 3		Chl
		M411	C24	C23	C35	C33	C211	C29	C261	C25	C16	C18
Bt	9	2	7	10	13	12	0	1	2	4	0	0
Ms	7	12	5	10	24	12	5	1	7	0.5	13	18
Ch	0	0.3	0	0	0	1	2	0	3	0	3	0
Co	1	9	10	11	0	1	0	1	0	2	0	0
Ga	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
Ap	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0.5	0
Ma	0	0.3	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Ca	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Sum	19	25	26	31	38	26	9	6	13	7	17	19
Im.Bt	7	1	1	1	0	3	0.5	0.6	2	1	5	3
Im.Ms	1	3	0.4	2	2	2	0.5	0.6	2	4	8	13
Im.Ch	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0.5	3
Im.Co	2	1	0	2	0	0	0.5	1	0	0.5	0.5	0
Im.Ga	1	1	0.4	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1	0
Sum	12	6	2	5	2	7	2	2	4	7	15	20
Whole %	31	31	28	36	40	33	11	8	17	14	32	39
Imp Ratio	39	18	7	15	6	21	20	31	23	51	47	51

17~32%と Bt 1 帯よりは若干少なめである。Grt 帯では特例を除くと 21~33%を示し, Bt 1, Crd 帯とほぼ同じレベルの値を示す。また, 最多鉱物として Bt 1 帯の白雲母+黒雲母から, Crd 帯の堇青石になり, Grt 帯の黒雲母と変化することが確かめられた。なお, 砂岩優勢の一之瀬川で

は、全‘その他の変成鉱物類’はCrd帯まで10%台であるが、Grt帯で25~54%と激増している。

2-4 変成度と全鉱物のモードの関係

まず、石英類のモードはホルンフェルスへの変成が進むと、小菅川に典型的に見られるようにBt1帯(C33)からCrd帯(C23)へとIm.石英類と比べて純粋な石英の方が多くなる。また、泉水谷に典型的に見られるように、全石英類の値がBt2帯で全岩の38~61%も占めていたものが、Grt帯で0%に減少する。この2つの特徴は、程度の差はあるものの4つの支流で認められる。

長石類のモードも変成が進むと、Im.長石類が減り、純粋な長石類が増加する。しかも、全長石類の値は石英類とは逆に増加する。

その他の変成鉱物類のモードは、Bt2帯からBt1帯へ進むところで激増している。その後も増加した値を維持して推移する。

この3グループの変化を等化学的な変成反応で考えれば、これは石英類が長石類やその他の変成鉱物類に大規模に変成した泥質岩変成の好例とみなすことが出来る。

なお、本地域の長石類の変成は、Bt2帯でAbが、Bt1帯でOrが、Crd帯でKfsが、Grt帯でPlがピークを作る序列を取るものといえる。Ab→Kfs(Orを含む)の変成については、飯山(1964 in 1994)は白雲母—パラゴナイト系のイオン交換に関する熱水合成実験において、100MPa、600℃でAbが出現し、650℃でKfsが出現することを示した。本地域では圧力の値は判明していないが、600℃でPl(オリゴクレス)が出現している(加賀美・谷口, 2000, 2002)ことから、圧力が飯山の実験より大きかったと考えられるが、本地域での長石類の変化は、飯山の実験での原組成、長石晶出順序、温度範囲などで説明される。

また、この地域では長石類の変成を見ると、変成度が上がるにつれていずれもオリゴクレス斜長石が形成される。これに関して、Spear et al. (1991)はNCMnKFMASH系が累進変成する過程で、Caを含むザクロ石が成長するためには斜長石の消費が必要であり、その結果、斜長石はAb質に片寄ると述べている。このようにオリゴクレスが形成されるのは一つに温度上昇であるが、もう一つはザクロ石との共生であると考ええる。なお、彼らのP-T図で結晶成長のトレンドをみると、ザクロ石と斜長石が共に成長する安定領域は低圧で高温側にあることが示されている。

以上の事実と本地域の長石類の晶出順序からみて、Pl(オリゴクレス)が増加するのは温度が上昇したためで、それは後述するように局地的に熱が過剰に供給されたものと考ええる。

2-5 新モードによる変成分帯と反応関係

前章で述べた3つのグループのモードから、以下に検討するように、それぞれの変成分帯の定

義と、泥質岩（泉水谷と小菅川の場合）に卓越する鉱物共生を新たに量的な序列として示すことができた。なお、本地域の変成分帯は、領家帯の柳井地方の低・中変成分帯にかなり似ている（Ikeda, 1998；池田, 1992）ので、参考にした。次に、各帯の鉱物共生を説明する反応関係を検討する。

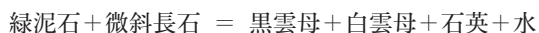
Bt 2 帯（緑泥石・黒雲母帯）：Ab で特徴付けられる長石類が 48～49%，Im. 石英類が卓越する石英類が 42～46%，それに白雲母+黒雲母よりなる雲母類 9～17%より構成されている。雲母類は量的に少ないが、その分は層状珪酸塩鉱物の緑泥石がこの帯には相当量存在することによってバランスしている（加賀美・谷口, 2002）。なお、層状珪酸塩鉱物の緑泥石は、次の Bt 1 帯で雲母類が増えるに伴って 0 となる。この帯の共生鉱物としては、量の多い順に、緑泥石+白雲母+黒雲母+石英±アルバイトとなっている。

このような鉱物共生を説明する反応関係は以下のように示される（Mather, 1970）。



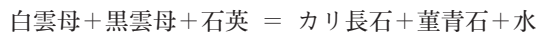
Bt 1 帯（黒雲母帯）：Or～Kfs で特徴付けられる長石類が 47～51%，Im. 石英類が減少し、純粋な石英が主となる石英類は 29%と Bt 2 帯と比べて顕著に少なくなる。この減った分を補うように、雲母類が 20～28%と増加している。この帯の共生鉱物は、微斜長石+石英+白雲母+黒雲母である。

このような鉱物共生を説明する反応関係は以下のように示される（Mather, 1970）。



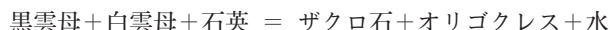
Crd 帯（堇青石帯）：Kfs が卓越する長石類が 50～58%と微増している。この分を石英類が 17～21%と減少して補償している。石英類では、Im. 石英類が最低になり純粋な石英が主となる。雲母類は 22～30%と若干増える。この帯の共生鉱物の組み合わせは、カリ長石+石英+堇青石+白雲母+黒雲母である。

このような鉱物共生を説明する反応関係は一例として以下のように示される（Pattison and Harte, 1991）。



Grt 帯（ザクロ石帯）：Pl（オリゴクレス斜長石）が卓越する長石類が 64～68%に達する。その分、石英類は 3～8%と最低となる。雲母類は 25～31%と微増し、ザクロ石が出現する。この帯の共生鉱物の組み合わせとして、オリゴクレス+黒雲母+白雲母+堇青石±ザクロ石となる。なお、本帯の黒雲母、白雲母は共に Al-poor の成分変化を示し（加賀美・谷口, 2002）、そのこと自体が両者は反応関係に寄与していることを示している。この Al の若干の放出はオリゴクレスの形成で補償されたと考える。

このような鉱物共生を説明する反応関係は一例として以下のように示される（Barbey et al., 1999）。



あるいはまた、次のようにも示される。



3. EPMA 積算化学組成値と変成流体现象

EPMA 分析で、Im. 石英類類、Im. 長石類、Im. その他の変成鉱物類を洩れなく拾い出すことが可能になったことは、そのモードが全母集団つまり全岩に対して議論できるようになったことを意味する。そこで次に、同じような見方から EPMA 線分析（ライン・アナリシス）法により分析した“鉱物集合体の積算化学組成値”の有効性を検討する。また、その結果明らかにされた変成流体について議論する。

3-1 EPMA 線分析法の利用について

薄片の顕微鏡観察によって決定した代表的な範囲について、EPMA による線分析を行った。一試料について測定間隔は $75\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ で 134~255 測点の分析を行った。途中でボイドがあればそれは除くので、測定数は試料によって異なる。この積算化学組成値の測定数が地点によりバラバラでは、比較ができないので仮に 100 測点の積算値に換算することにより相互比較することにした。単位はアトミック・フォーミュラー・ユニット (afu) である。なお、酸素量は最も産出の多い長石類に合わせて 8 とした。こうして得られた分析値を、代表的な元素、Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K の 8 種について示した (表 4, 図 4)。

XRF 全岩分析値と EPMA 積算化学組成値の比較 : K202, K84, K821 の 3 点について、両分析による比較を行った (表 5)。{(EPMA 積算化学組成値) - (XRF 全岩分析値)} / (XRF 全岩分析値) を求め、その平均値を出したものを表 5 の最右端に示す。これを見ると Si や Al などは 10% 以内の誤差にすぎないので問題ないといえる。Volatile として重要な Na と K については、10% 台の誤差を示している。この程度の相違であれば EPMA の測定精度を考慮すれば、充分安全に議論して差し支えない。しかし、Ca から Fe にかけての組成については誤差の値が大きいため注意して議論しなければならない。

以下の議論においては、表 4 を使い Si-Al の動向を検討し、図 4 を使い主に volatile の成分の変動を検討する。なお、鍵カッコ内に示した数字はバラついた値をとるものである。

3-2 EPMA 積算化学組成の計測例

分析の結果を一之瀬川から検討する (表 4-a, 図 4-a)。この系列の特徴は、Si の値が 320~330 と大変高いことで、恐らく、砂岩優勢域の特徴と考える。Si は Bt 1 帯で 311~330, Crd

表 4-a EPMA 積算化学組成値 (一之瀬川)

Zone	Grt			Crd			Bt 1		
Loc	K561	K551	K26	K66	K68	K692	K702	K72	K73
Si	298.09	331.64	228.43	319.29	312.62	325.75	330.29	311.75	316.18
Ti	2.11	1.96	1.53	1.19	1.23	1.02	0.96	1.13	0.73
Al	91.22	55.19	81.29	74.19	80.28	65.11	62.51	81.34	74.57
Fe	20.07	18.60	64.69	9.44	11.39	13.29	8.68	9.90	9.73
Mn	0.47	1.57	0.66	0.14	0.19	0.23	0.21	0.20	0.20
Mg	11.76	12.98	16.80	5.56	7.73	5.10	6.07	6.68	6.89
Ca	7.22	4.54	50.49	3.34	3.92	8.64	4.29	17.12	10.09
Na	20.20	6.66	19.37	31.40	28.56	36.99	24.35	22.89	29.81
K	24.96	14.37	10.05	25.99	27.81	5.44	23.83	12.36	15.38
Si + Al	389.32	386.83	309.72	393.48	392.90	390.86	392.80	393.08	390.75
Fe + Mg	31.83	31.59	81.49	14.99	19.13	18.40	14.75	16.58	16.61
Na/Na+K	0.45	0.32	0.66	0.55	0.51	0.87	0.51	0.65	0.66
Al/Si+Al	0.23	0.14	0.26	0.19	0.20	0.17	0.16	0.21	0.19
Al/Ca+Na+K	1.74	2.16	1.02	1.22	1.33	1.27	1.19	1.55	1.35

表 4-b EPMA 積算化学組成値 (柳沢川)

Zone	Grt	Crd	Bt 1				(MnG)		Bt 2		Chl
Loc	K9-6	K10	K202	K25	K64	K882	K73	K86	K84	K821	K6
Si	296.69	291.01	280.89	302.65	313.99	306.71	324.64	297.80	347.35	323.26	341.93
Ti	1.38	1.72	0.53	3.94	2.13	2.02	0.70	3.47	0.44	0.17	0.36
Al	79.81	92.98	121.19	90.88	78.77	88.08	65.19	86.76	50.08	75.47	52.52
Fe	17.41	17.25	14.89	14.92	16.13	16.31	9.04	18.56	3.38	4.58	3.82
Mn	0.30	0.64	0.17	0.37	0.32	0.68	0.19	3.65	0.09	0.12	0.10
Mg	7.21	12.98	10.70	8.24	10.84	12.08	6.32	11.12	1.81	3.34	2.37
Ca	15.86	4.77	5.50	8.34	2.35	2.79	9.71	8.96	5.51	3.24	3.65
Na	30.40	24.16	19.53	22.25	11.59	11.53	22.42	35.36	30.13	39.14	22.45
K	12.14	23.15	27.91	24.00	21.41	24.96	16.08	13.64	5.34	17.66	15.97
Si + Al	376.50	393.98	402.08	393.53	392.76	394.79	389.83	384.57	397.43	398.73	394.55
Fe + Mg	24.62	30.23	25.59	23.16	26.97	28.39	15.36	29.68	5.20	7.92	6.19
Na/Na+K	0.71	0.51	0.41	0.48	0.35	0.32	0.58	0.72	0.85	0.69	0.58
Al/Si+Al	0.21	0.24	0.30	0.23	0.20	0.22	0.17	0.23	0.13	0.19	0.13
Al/Ca+Na+K	1.37	1.79	2.29	1.66	2.23	2.24	1.35	1.50	1.22	1.26	1.25

帯で 312~[325], Grt 帯で [228]~331 とあまり変わらない傾向を示す。Al に関しては Bt 1 帯で 62~81, Crd 帯で [65]~80, Grt 帯で [55]~91 を示し、やや微増の傾向を示す。次に、表を左から検討すると、Grt 帯の K26 では Fe が 64 と多くなっており、Fe+Mg が他より 2~3 倍も多くなっている。また、Ca が K26 で 50 と他の 3~4 倍も多くなっている。これらの特徴は通常の変成作用では説明できないので、後で議論する。K692 も Na が 36 もあり、他より 1.5 倍も多い。また、 $X_{Na} \{=Na/(Na+K)\}$ も 0.87 と突出している。この地点も後で議論する。このような局地的な傾向を除くと、Fe+Mg が Grt 帯以下のところで、14~19 であるのに Grt 帯において 31 以上になる積算化学組成値の変化は、全 'その他の変成鉱物類' の値が Crd 帯で 7~17 であるのに、Grt 帯で 25~54 と増加するのに密接に対応している。

柳沢川の EPMA 積算化学組成値を検討すると (表 4-b, 図 4-b), Si は Bt 2 帯で 323~347, Bt 1 帯で 280~313, Crd 帯で 291, Grt 帯で [296] と減少する。Al は Bt 2 帯で 50~75, Bt 1

表 4-c EPMA 積算化学組成値 (泉水谷)

Zone	Grt				Crd			Bt 1		Bt 2			
Loc	M14	M18	M15	M16	M21	M23	M24	M29	M30	M34	K111	K110	K83
Si	274.03	265.67	282.42	282.43	281.60	301.90	301.36	246.18	270.77	322.51	301.40	342.74	316.90
Ti	2.63	2.76	2.74	2.09	2.66	2.65	2.12	3.39	2.85	0.79	2.91	0.78	0.94
Al	109.21	113.80	103.30	104.49	104.88	85.20	94.67	141.10	110.43	71.83	79.87	51.52	75.20
Fe	16.35	18.86	18.28	21.24	16.66	17.53	13.29	27.49	25.35	11.82	16.92	9.96	11.77
Mn	0.20	0.24	0.28	0.20	0.21	0.20	0.21	0.43	0.43	0.28	0.27	0.12	0.23
Mg	11.70	12.65	12.76	16.30	10.79	11.17	7.59	18.05	13.97	6.17	9.91	4.81	6.60
Ca	12.59	14.93	9.24	6.92	8.50	5.32	7.86	8.93	11.16	7.99	10.04	3.59	8.37
Na	42.57	62.58	34.62	31.80	22.82	29.16	30.09	28.42	37.11	22.68	22.34	16.22	35.69
K	40.91	16.60	32.29	25.95	39.01	27.11	24.76	38.91	34.27	15.37	18.71	16.51	12.25
Si + Al	383.23	379.46	385.72	386.92	386.48	387.10	396.03	387.28	381.20	394.34	381.27	394.26	392.10
Fe + Mg	28.05	31.51	31.04	37.54	27.45	28.70	20.88	45.54	39.31	17.99	26.84	14.76	18.37
Na/Na+K	0.51	0.79	0.52	0.55	0.37	0.52	0.55	0.42	0.52	0.60	0.54	0.50	0.74
Al/Si+Al	0.28	0.30	0.27	0.27	0.27	0.22	0.24	0.36	0.29	0.18	0.21	0.13	0.19
Al/Ca+Na+K	1.14	1.21	1.36	1.62	1.49	1.38	1.51	1.85	1.34	1.56	1.56	1.42	1.34

表 4-d EPMA 積算化学組成値 (小菅川)

Zone	Grt	Crd			Bt 1			Bt 2		Bt 3		Chl
Loc	M411	C24	C23	C35	C33	C211	C29	C261	C25	C16	C18	C8
Si	258.42	281.49	294.84	274.46	291.30	288.44	321.88	335.40	299.49	319.13	292.13	282.35
Al	119.80	109.47	85.20	117.21	99.01	99.85	71.34	52.51	94.15	76.59	98.58	114.65
Fe	24.75	18.05	37.79	20.08	19.48	18.21	14.10	6.09	11.95	12.91	24.08	15.75
Mn	0.81	0.37	0.29	0.33	0.37	0.22	0.16	0.27	0.18	0.12	0.46	0.47
Mg	15.91	11.97	9.97	15.25	12.50	12.62	6.79	3.74	9.41	7.02	14.51	10.73
Ca	21.81	6.44	7.89	3.93	5.84	5.94	3.41	23.09	8.11	4.54	1.52	4.20
Na	47.94	32.37	22.36	20.73	22.73	29.77	25.24	23.19	24.45	22.43	13.80	18.52
K	14.03	29.79	19.58	41.30	24.38	32.01	18.01	9.77	21.63	15.15	21.09	29.96
Si + Al	378.21	390.96	380.05	391.67	390.31	388.29	393.22	387.92	393.64	395.72	390.72	397.00
Fe + Mg	40.66	30.02	47.76	35.33	31.98	30.82	20.89	9.83	21.35	19.93	38.59	26.48
Na/Na+K	0.77	0.52	0.53	0.33	0.48	0.48	0.58	0.70	0.53	0.60	0.40	0.38
Al/Si+Al	0.32	0.28	0.22	0.30	0.25	0.26	0.18	0.14	0.24	0.19	0.25	0.29
Al/Ca+Na+K	1.43	1.60	1.71	1.78	1.87	1.47	1.53	0.94	1.74	1.82	2.71	2.18

帯で 78~121, Crd 帯で 92, Grt 帯で [79] となっており, Bt 1 帯と Bt 2 帯の間でギャップがみられ, Si が減り Al が増加するのが見られる。これは全石英類の変化と対応しているようにみえる。Fe や Fe+Mg は丁度その反対で, Fe+Mg の値は Bt 2 帯で 5~7, Bt 1 帯で 23~28, Crd 帯で 30, Grt 帯で [24] となっており, Bt 2 帯と Bt 1 帯の間で大きなギャップが観察される。これは白雲母と黒雲母のモードの増加と対応している。なお, Mn が K86 で 3 を越える値を示し, 特異点となっている。ここでは Mn ザクロ石が出現した。Na が Bt 2 帯で 30~39 と増加している。周囲が 20 台の値であるから, 著しく増加したといえる。この増加した Na は Ab の増加に対応している。Bt 1 帯で K が 21~27 と自然増加しているが, この K が Or+Im.Or の増加に対応している。Crd 帯で K はなお 23 と多いが, これが Kfs の増加に対応する。Grt 帯で Ca が増えて 15 と最高値を示すが, この一部はオリゴクレスの増加に対応すると考える。

泉水谷の EPMA 積算化学組成値を検討すると (表 4-c, 図 4-c), Si は Bt 2 帯で 301~342,

表5 XRF 全岩分析値と EPMA 積算化学組成値の比較

Loc	XRF	EPMA	Difference	%	XRF	EPMA	Difference	%	XRF	EPMA	Difference	%	Average Diff	Average %
	K202	K202			K84	K84			K821	K821				
SiO ₂	59.65	62.71	-3.06	-0.05	78.52	82.69	-4.17	-0.05	75.49	75.49	0	0.00	2.41	0.03
TiO ₂	0.83	0.14	0.69	0.83	0.37	0.12	0.25	0.68	0.36	0.05	0.31	0.86	0.42	0.79
Al ₂ O ₃	22.2	21.4	0.8	0.04	11.71	9.55	2.16	0.18	13.97	14.3	-0.33	-0.02	1.10	0.08
Fe ₂ O ₃	1.27				0.44				0.68					
FeO	3.80	3.39	1.68	0.33	1.32	0.77	0.99	0.56	2.05	1.68	0.62	0.23	1.10	0.37
MnO	0.09	0.04	0.05	0.56	0.04	0.02	0.02	0.50	0.05	0.03	0.02	0.40	0.03	0.49
MgO	1.6	1.38	0.22	0.14	0.35	0.23	0.12	0.34	0.88	0.43	0.45	0.51	0.26	0.33
CaO	1.72	1.14	0.58	0.34	1.28	1.16	0.12	0.09	1.2	0.69	0.51	0.43	0.40	0.29
Na ₂ O	2.52	2.24	0.28	0.11	3.77	3.55	0.22	0.06	3.66	4.6	-0.94	-0.26	0.49	0.14
K ₂ O	5.12	4.47	0.65	0.13	1.4	0.89	0.51	0.36	3.08	3.04	0.04	0.01	0.40	0.17
P ₂ O ₅	0.14	0.01	0.13	0.93	0.05	0.06	-0.01	-0.20	0.05	0.01	0.04	0.80	0.06	0.64
Total	98.93	96.98	1.95	0.02	99.23	99.08	0.15	0.00	101.47	99.72	1.75	0.02	1.28	0.01

Bt 1 帯で [246]~270, Crd 帯で 281~301, Grt 帯で [265]~282 となっている。Al については Bt 2 帯で 51~79, Bt 1 帯で 110~[141], Crd 帯で 85~104, Grt 帯で 103~[113] となり, Bt 2 帯から Bt 1 帯への変化が突出して大きくなっている。Si+Al としてみると, Bt 2 から Bt 1 帯の間と Crd から Grt 帯への間にギャップがあって変化しているように見える。これは全石英類の挙動と一致している。また, Fe+Mg は Bt 2 帯で 14~26, Bt 1 帯で 39~45, Crd 帯で 17~27, Grt 帯で 21~33 となっている。大きなギャップは Bt 2 帯から Bt 1 帯に移行するところでみられる。この変化は, 全 'その他の変成鉱物類' の増加と一致している。なお, Bt 1 帯の M 29 では Fe+Mg の値が 45 とピークをなし, そこでは全 'その他の変成鉱物類' が 60% を越える大きな値を示し, 異常なものと判断される。K は Bt 2 帯で 12~18 と少なく, Bt 1 帯で 34~38 と多くなり, これが Or の増加に対応するようにみえる。Crd 帯で K は 24~39 と多いが, これが Kfs の増加に対応する。Grt 帯で Ca が 12~14 と多くなっているが, この一部が Pl の増加に対応すると考えられる。

小菅川の EPMA 積算化学組成値を検討すると (表 4-d, 図 4-d), Si は Bt 3 帯で 292~319, Bt 2 帯で 299~[335], Bt 1 帯で 288~321, Crd 帯で [274]~294, Grt 帯で [258] となっている。Al については Bt 3 帯で 76~98, Bt 2 帯で [52]~94, Bt 1 帯で 71~99, Crd 帯で 85~[117], Grt 帯で [119] となっている。大きなギャップは Bt 1 と Crd 帯の間に存在している。Si+Al の値は 390 台とほぼ一定している。しかし, C261 において Si の値は 335 と桁はずれに大きくなっており, ここでは Im. 石英類の量も増えている。この地点は例外として後で詳細に述べる。それを除外すると, Si は Bt 2 帯や Bt 3 帯の 290~330 から, Crd 帯や Grt 帯の 250~290 に減少する。これは Si+Al の値が全体を通じて変わらないことから, Al が増加したといえる。事実, Crd 帯や Grt 帯では Al が 117~119 と増大している。この理由に付いて後で議論する。Fe+Mg であるが, Bt 3 帯で 19~38, Bt 2 帯で 9~21, Bt 1 帯で 20~31, Crd 帯で 30~47, Grt 帯で 40 と

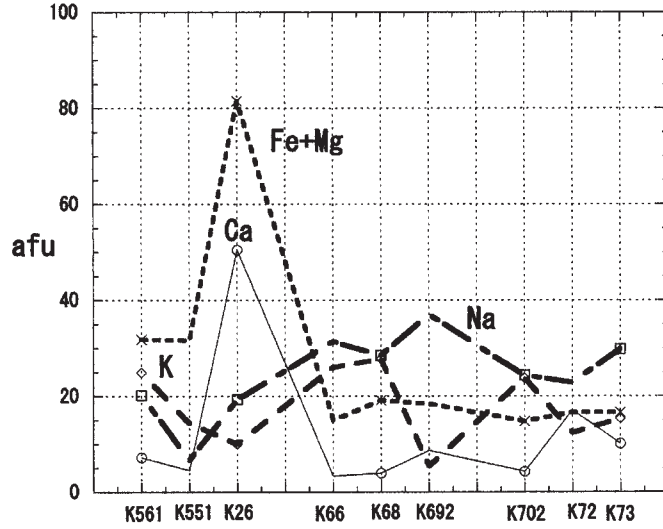


図 4-a Ca, Na, K, Fe+Mg の EPMA 積算化学組成 (一之瀬川)

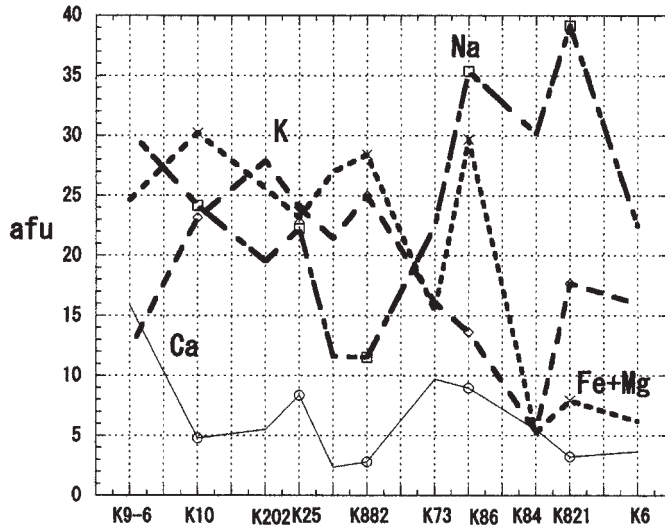


図 4-b Ca, Na, K, Fe+Mg の EPMA 積算化学組成 (柳沢川)

なっている。増加を示す大きなギャップは Bt 2 帯から Bt 1 帯と、Bt 1 帯から Crd 帯のところである。Crd 帯の C 23 の値が大きいが、ここでは鉄鉱物があったためと考える。これを除くと次に大きいのが Grt 帯の M411 である。M411 では Mn の値も他の 2 倍は多く注目される。この Mn はザクロ石に含まれている。次に、Ca は C261 と M411 において他の数倍ほど多くなっている。C261 では地層中に明らかに方解石岩脈を形成していることから、Ca 値を上げるような外的な寄与があったものと考えられる。そして Ca の増加分だけ Fe+Mg が減少している。M411 でも Ca は多いが、ここではアパタイトとして基質中に含まれている。Na はほぼ全サンプル一様

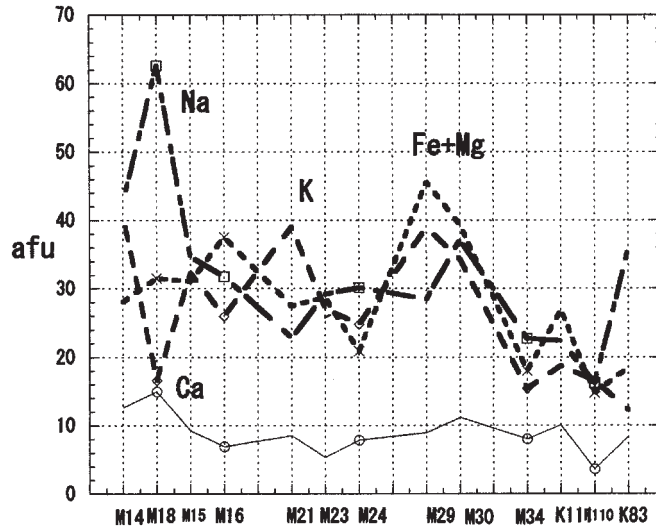


図 4-c Ca, Na, K, Fe+Mg の EPMA 積算化学組成 (泉水谷)

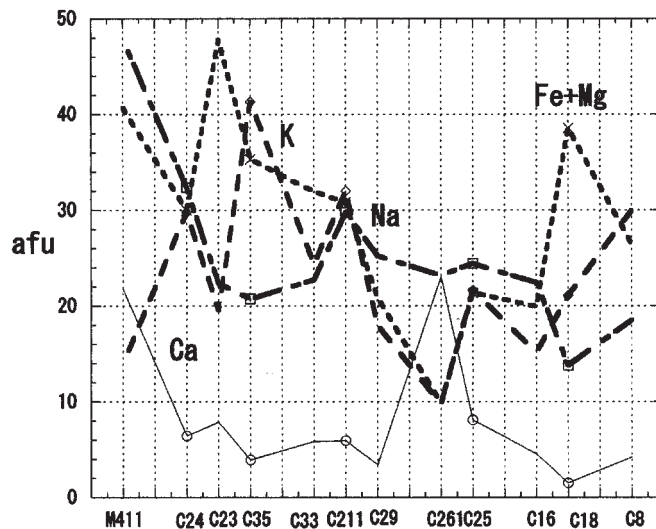


図 4-d Ca, Na, K, Fe+Mg の EPMA 積算化学組成 (小菅川)

に 20 程度の値を示しているが、M411 において他の 2 倍の 47 を示しており、他の成分 Ca, Mn などと共に特異である。最後に K は、Bt 1 帯の C211 で 32 と Crd 帯の C35 において 41 と大きく、それぞれ Or と Kfs に配分されたと解釈される。

3-3 EPMA 積算化学組成のまとめと問題点

以上見たように、本調査地域では Si が減少し、Al が増加することが認められる。その変化は 10% 程度の変化であり、Rollinson (1993) がいうように高温で SiO_2 が移動した結果、Al が相

対的に増加したものと考えると、積算化学組成は十分に使用に耐えるデータを提示している。

また、長石類の Ab, Or, Kfs, Pl の出現と積算化学組成の Na, K, Ca の変化の様子は、全体的には一致しているとみなせる。この点でも積算化学組成値は十分に利用できると判断される。

一方、図 4-b と図 4-d に示される Fe+Mg 値の Bt 1 帯以降の増加は、等化学的な変成反応では説明が付かない。Fe+Mg 元素の供給はどのようにして賄われたのかを見るために、別途行った X 線回折による層状珪酸塩鉱物の分析結果を検討する(加賀美・谷口, 2000, 2001, 2002)。なお、ここで述べる層状珪酸塩鉱物の緑泥石の量比は一定条件のもとでの X 線ピーク強度である。

まず、柳沢川の緑泥石の X 線強度は Bt 2 帯において 200~900 で、Bt 1 帯で 100 以下になり、Crd, Grt 帯では 0 となる。量的な変化からみると、Bt 2 帯から Bt 1 帯への移行において、先に述べた全 'その他の変成鉱物類' のモードや Fe+Mg の値の変化に対応しているようにみえる。

泉水谷の緑泥石は Bt 2 帯で 470~600 あるのに、Bt 1 帯で 0 になる。この大量の緑泥石の Fe+Mg の値が Bt 1 帯の雲母類の形成に関与したと判断される。なお、この地域では Crd 帯で緑泥石が再び現れ 200 あり、Grt 帯では 540~630 も存在する。おそらくこの緑泥石の新たな出現は火山性原岩の性質を反映しているものと判断される(加賀美・谷口, 2001)。

小菅川では、緑泥石は Bt 3 帯で 500~720, Bt 2 帯で 170~910 (平均で 300), Bt 1 帯, Crd 帯で 0 となる。つまり、Bt 2 帯に存在した緑泥石の Fe+Mg 値が Bt 1 帯で 0 になり、全 'その他の変成鉱物類' のモード増加に賄われたものと解釈される。

以上から Bt 2 帯から Bt 1 帯にかけて、温度上昇に伴い非晶質の緑泥石成分が雲母類に変成したことが、Fe+Mg 値の増加の原因と判断される。このような場合には、EPMA 積算化学分析は機能しないと考えられる。

もう一つ傍証として検討に値するのは、EPMA 線分析された個数は少ないが緑泥石のモード変遷である(表 3)。柳沢川では Bt 1 帯で Im. 緑泥石が無くなり、Crd 帯で全緑泥石が無くなる。泉水谷では Bt 2 帯ですでに Im. 緑泥石が無くなり、Bt 1 帯で純粋な緑泥石のモードも最低となる。小菅川では Bt 1 帯で Im. 緑泥石が減少し、Crd 帯で純粋な緑泥石が激減する。これらの傾向は層状珪酸塩鉱物の消長と同様な結果を示している。

ここで、積算化学組成値の誤差が最低であることから、安全に利用できると考えられる Al とアルカリの値に対する変成分帯との関係を議論する。Manias and Piccoli (1989) は、 $A/CNK_{mol} \{= Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)\}$ の指標で、値の小さいグループを peralkaline とし、大きいグループを peraluminous とした。この指標を利用した Breaks and Moore (1992) は前者を Arc granites の範疇に、後者を Continental granites の範疇に属するものとした。

筆者らの積算化学組成では、上記の指標は元素に置き換えて使うので、仮に積算値という意味で cum を使うことにする。つまり、 $A/CNK_{cum} \{= Al / (Ca + Na + K)\}$ である。これを使うと、泉水谷では Bt 1 帯で 1.3, Crd 帯で 1.4~1.5, Grt 帯で 1.1~1.6 となる。Grt 帯の平均値は

1.3であり、それを考慮すると Crd 帯でピーク値となり、1.5を示している。また、小菅川では Bt 1 帯で 1.5~1.9, Crd 帯で 1.6~1.8, Grt 帯で 1.4 となる。Bt 1 帯の平均値は 1.6 であり、それを勘案すると Crd 帯でピーク値となり、1.7を示していることが分る。筆者らはこのことから、Crd 帯でアルミ鉱物の堇青石が出現するのは、この理由からであり、更にもし関東山地で紅柱石などの Al_2SiO_5 鉱物が発見されるなら、Crd 帯が最も可能性が高いと考える。しかし、これまでに本地域で Al_2SiO_5 鉱物が見つかっていないのは Al の絶対量が少ないためと考えている。

3-4 流体貫入地点の地学的背景

EPMA 線分析法による積算化学組成値が手軽に見られるようになったことから、化学組成の変化、特に Na や K などの揮発性成分と Fe, Mn 等の遷移元素の異常増加が確認された (図 4)。柳沢川の K86 では、Na の積算化学組成値は 35 もあり、その他 Fe, Mn, Na の異常増加が見られた。ここは Mn ザクロ石 (Mahar et al., 1997) が出現した所である。また、オリゴクレスがここで多くなっているのは温度上昇の証拠であり、熱も過剰に供給されたものと解釈できる。K9-6 は Fe, Ca, Na に異常増加がある。さらに露頭において、数 cm~数 10 cm の花崗岩質や方解石を含む小岩脈が貫入しているのが観察されたことから、流体の影響は確実である。泉水谷では、M29 で Fe, Mn, Mg, K に異常増加があり、K の揮発性成分が大きいことから流体の存在が考えられる。M18 では Ca, Na の異常増加があり、これも流体の影響と考えている。小菅川では、C261 で Ca が多く、薄片の中に方解石脈が見られることから流体と認定した。C35 で K が多く、露頭でも巨大岩脈直上にあることから流体の影響と判断した。M411 は Mn, Ca, Na が異常に多く、また花崗閃緑岩の岩盤上に位置する産状から流体の存在があると考えた。これらの事実から甲府深成岩からの熱拡散によるホルンフェルス形成時に、流体貫入による物質移動の現象があったものと判断される。そこで物質移動の観点から石英のモードを再度検討することにする。

泥岩の卓越する地域である泉水谷に典型的に見られるように、Bt 2 帯の K83 から、Grt 帯の M14 に向かって、全石英類の値が 38~61% から 0~1% に減少する変化がみられる。この全般的な傾向に合わない物質の異常集積が M29 や M18 において観察された。全石英類でみると、M29 の前後では、M30 で 11%, M24 で 23% であるのに、M29 では 4% と少なくなる。また、M18 の前後では、M15 で 12%, M14 で 1% であるのが、M18 で 0% となる (表 1-c)。

小菅川では、全石英類の値は Bt 2 帯での 24~59 から、Grt 帯の 3 へと、泉水谷の試料と同様に変化するのがみられる。特に C261 の全石英類が 59% と増加することに注目される。前後の C25 で 24%, C29 で 41% であるから、その増加率は異常である。一方、C35 では 9%, M411 では 3% と減少する。C35 の前後では、C33 で 30%, C23 で 30% であるから、この変化は明瞭である。また、M411 の前では C24 で 13% であるから、やはり明らかに減少している (表 1-d)。

これに反して、最北の一之瀬川では、全石英類の値は Bt 1 帯での 36~44% から、Grt 帯の 21~57% へと Im. 石英類は減る傾向にあるものの純粋の石英はむしろ増加するように見える。これは、母岩が砂岩卓越によるものと考えられる。それでも、K692 の全石英類は 45% で、前後の K72 での 36%、K68 での 30% と比べれば増加しており、K26 の全石英類は 21% で、前後の K66 での 33%、K551 での 57% と比べれば、明らかに減少している (表 1-a)。

柳沢川では、この南北支流の中間の傾向が見られる。全石英類の値は Bt 2 帯での 32~55% から、Grt 帯の K9-6 での 33% と減少しているように見えるが、絶対値としては依然大きな値である。また、手前の K10 の全石英類は 28% であるから、K9-6 に向かって増加しているともいえる。K9-6 では、泥岩起源であるにも係わらず、純粋な石英、Im. 石英類ともに増加している。これは、他の例と同様に流体に由来して Si が付加したものと考えられる。また、K86 の全石英類は 25% であるが、前後の K84 での 55%、K73 での 49% と比べれば、明らかに減少している (表 1-b)。

次に、NaCl 系熱水や珪酸質熱水、さらに Ca 系熱水などについては、以前からの豊富な文献が存在するが、K を含む熱水についてはあまり事例が多くない。そこで、K 成分の多い C35、M29、K39 について石英モードの変化やその他の鉱物の変化を詳述する。

C35 は小菅川上流で、天狗棚沢出いの標高 1440 m にみられる黒色砂質泥岩である。この露頭直下には厚さ (高度差) にして 150 m 水平距離にして 600 m もある花崗閃緑岩の巨大岩脈があり、この泥岩は岩脈の上盤をなしていることが調査時に確認された。しかし、この岩脈は熱的には変成度あまり寄与しておらず、周辺地域と同じ Crd 帯の範囲を越えていない。この地点の全石英類の値は 9 (%) であるのに、周囲の地点の値が 30% であることから、これは変成帯の変化とは違う別の要因が働いていると考えられる。積算化学組成において、K の値がここでは 41.3 (afu) と断然多くなっている。周囲の地点では最高が 32 で、大半が 10~20 台であるから、約 2 倍多いことになる (表 4-d)。長石類のモードは、Pl (12%)、Kfs (29%) と Kfs がより多く作られている。そのため全長石類は 54% と多くなっているが、この値は周囲の値 (64~76%) に比べると、むしろ小さい。その分を補って全 'その他の変成鉱物類' が 36% と多くなっている。以上検討したように、石英の突然の減少は K を含む流体が直下にある岩脈から供給された結果、反応が進んで石英は黒雲母、白雲母、堇青石を作ることによって消費されてしまったものと判断される (表 3-d)。

M29 は泉水谷の大黒茂谷出合い下流にみられる黒色頁岩で、コンタクトから 1650 m 離れた Bt 1 帯に属する。通常このように熱源から遠く離れたところでは、石英のモードは大きいのが普通であるが、全石英類の値は 4% を示し、周囲の値は 11~23% であるから著しく少なくなっている。ここでは、石英だけでなく長石類も減少している。この地点の全長石類は 33% であるのに両隣は 60~61% と 2 倍近くもある。このように、周囲の変成とは関係なく、変化が進む状

態は異常である。なお、M29の積算化学組成ではKは39 (afu)と突出し、白雲母の形成に関与している(表3-c)。泉水谷では堇青石が良く発達する傾向があり、三連双晶の堇青石を記載した。M29ではAlが141と最高の値を示す。前後の地点では94と110であるから、特別に高いAlの値を示すから堇青石が出現してよいのに、AlもSiも全て白雲母形成に使われていて異常である。

K39は南秋川上流にある三頭山の三頭大滝の上流で、コンタクトから50mしか離れていないところにあり、変成帯としてはCrd帯に属する。ここでは幅15cmのアプライト岩脈が塊状砂質ホルンフェルス貫入している。この場所の全石英類のモードは5%であるが、前後の値は43~45%であるから、著しく減少している。長石類のモードは、Pl(30%)、Kfs(22%)、それにIm長石類(11%)があり、全長石類で64%に達している。また、全‘その他の変成鉱物類’が30%あり、その主体が白雲母(16%)となっている。

このような鉱物組成を反映して、積算化学組成ではKが33.8 (afu)と著しく多くなっている。前後では14~23%であるから、顕著に増加したといえる。このKの富化が原岩の不均一性によるものか議論の分かれるところであるが、ここではアプライト脈の存在と全石英類の頻度の変化を考慮して流体の影響と判断した。

3-5 変成流体相 (Fluid flow facies) について

関東山地の5地域(一之瀬川、柳沢川、泉水谷、小菅川、三頭山)の51地点のホルンフェルスについて、変成鉱物のモードと積算化学組成を検討した結果、11例の成分異常富化の事例を観察した。それらは花崗閃緑岩の岩脈に接しているとか、石英や方解石の細脈に抜かれているな

表6 石英モードによる変成流体相の分類

変成流体相	積算化学組成による区分	変成分帯	Nor Qz/Im Qz (%)	サンプル番号	型式番号
石英消費型変成流体相	Pl生産型高Na流体	ザクロ石帯	1/2	M411	①-a
			0/0	M18	①-a
	Pl生産型高K流体	堇青石帯	0/5	K39	①-b
	Kfs生産型高K流体	堇青石帯	4/5	C35	①-c
	Ms生産型高K流体	黒雲母1帯	1/3	M29	①-d
石英生産型変成流体相	Pl共存型高Si流体	ザクロ石帯	18/15	K9-6	②-a
	Pl共存型高Si流体	堇青石帯	37/9	K692	②-a
	Ca付加1型高Ca流体	ザクロ石帯	16/6	K26	②-b
	Ca付加2型高Ca流体	黒雲母2帯	24/35	C261	②-c
中間型変成流体相	Mn付加型混合流体	黒雲母1帯	4/21	M86	③-a
	Ab生産型混合流体	黒雲母1帯	10/14	K75	③-b

Pl = Oligoclase
Ms = Muscovite

Kfs = Kali Feldspar
Ab = Albite

どの産状観察を合わせて考慮すると、その原因は流体 (fluid flow) の影響によるものと判断した。

ここではホルンフェルス化と同時的な変成流体相について、石英のモードを基準にして分類すると大別して2つのグループに識別されるので、以下においてその記載を試みる。1つ目のグループは、石英消費型で5例ある。2つ目のグループは石英があまり消費されていないので、仮に石英生産型と呼び、4例が認められた。そして両者の中間型として、純粋な石英を消費するが、Im. 石英類を生産するものが2例認められた (表6)。

なお、石英消費型は $X_{Al} \{= Al/(Al+Si)\}$ の値が 0.29 より大きい特徴があり、一方、石英生産型では X_{Al} の値が 0.26 より小さいという明瞭な違いが認められる。この基準によれば、中間型は後者に属することになる。

1) 石英消費型変成流体相

①-a 型 (Pl 生産型)

M411, M18 (Grt 帯) : モードを調べると、全岩中純粋な石英は 0~1% の量比 (以下%は略す)、Im. 石英類も 0~2% しかなく、その分を Pl (48~66) を形成している。この量比にもとづいて、石英消費型を細分して呼ぶときは、Pl 生産型 (①-a 型) という。全 'その他の変成鉱物類' も 31 と増加している。

なお、EPMA 積算化学組成値をみると、Na (48~62 afu, 以下単位は略す) が極めて多いのが特徴である。Fe+Mg (32~41), Ca (15~22), Mn (0.2~0.8) などの元素が濃集しており、Pl 生産型の特徴と認められる。

①-b 型 (Pl 生産型)

K39 (Crd 帯) : 純粋な石英は 0, Im. 石英類も 5 と少なく、その分 Pl (30) を生産している。EPMA 積算化学組成では、K が 34 と著しく多くなっている。Na は 30 と平均的な値である。この Na と K の量比の違いが①-a と①-b を分ける理由である。

①-c 型 (Kfs 生産型)

C 35 (Crd 帯) : 純粋な石英 (4), Im. 石英類 (5) の消費型である。その分は全 'その他の変成鉱物類' (36), 特に Crd (10) に変わっている。また、Kfs (29) も増加してピークを形成している。この後者の特徴を取って、Kfs 生産型 (①-b 型) という。EPMA 積算化学組成では、Fe+Mg (35), Na (20) は特に増加はしていないが、K (41) は大きく増加している。K 富化の原因は、原岩の性質などによる可能性よりも、ここでは巨大岩脈の上に直接載るといふ産状観察から流体によると考える。

①-d 型 (Ms 生産型)

M29 (Bt 1 帯)：純粋な石英 (1), Im. 石英類 (3) の消費型である。長石類も数を減らしており、その分を全 ‘その他の変成鉱物類’ (63), 特に Ms (33) によって補われている。白雲母類の生成という点から考えて、上記 2 型よりは低温で形成されたものと思われる。この白雲母の特徴を取って Ms 生産型という。EPMA 積算化学組成値では、Fe+Mg (45), K (39) と増加しているのが特徴である。

2) 石英生産型変成流体相

②-a 型 (Pl 共存型)

K9-6 (Grt 帯)：純粋な石英 (18), Im. 石英類 (15) と、共に増加している。Pl (29) と比較的大きな値を示していることから、Pl 共存型 (②-a 型) と呼ぶ。共存と呼んだのは石英も Pl も共に増えているからである。全 ‘その他の変成鉱物類’ (18) は減少している。EPMA 積算化学組成では、Si が 297 と増加しているのが特徴である。Na(30), Ca(16)も比較的に増加している。Caが多いためか Fe+Mg (25) の値は大きくない。

K692 (Crd 帯)：純粋な石英 (36), Im. 石英類 (9) と量的に多い。これは砂岩起源のためであると考えられる。Pl (35) と一之瀬川域では最大であることから、Pl 共存型である。全雲母は (8) と極端に少ないのが特徴である。EPMA 積算化学組成では、Na (37) と比較的に高 Na の特徴を示しているが、Si が (326) と著しく増加しているのが特徴である。

②-b 型 (Ca 付加 1 型)

K26 (Grt 帯)：純粋な石英 (16), Im. 石英類 (5) と一之瀬川域では全石英類は最も少ない。その分、Bt (11), Crd (14), アパタイト (10) などが多くなっている (表 3-a)。Pl (22) も多くなっている。EPMA 積算化学組成で、Ca (50) と多く、Ca 付加型の範疇に入る。ただ、Fe+Mg が (81) と最大なのは鉄鉱物が混入した可能性もある。

②-c 型 (Ca 付加 2 型)

C261 (Bt 2 帯)：純粋な石英 (24), Im. 石英類 (35) とモードの半分を石英で占める。全 ‘その他の変成鉱物類’ (8) は極端に少なく、長石類では Ab (12) がただ一つピークを作るだけである。この地点は変成度の低い、まだ Im. 石英類が卓越する帯に属するのに、純粋な石英が多数産出するという異常を示しており、局所的に温度が上昇したものと判断される。積算化学組成では、Fe+Mg (10), Na (23) と特に多くはない。Ca (23) がピークを作るのが特徴で、Ca 付加型に入る。

3) 中間型変成流体相

③-a 型 (Mn 付加型)

K86 (Bt 1 帯) : 純粋な石英 (4%) と消費型であるのに, Im. 石英類 (20%) と生産型であるので, この特徴をもって中間型 (3 型) と呼ぶ。全 ‘その他の変成鉱物類’ (18), Pl (14) と多くなっている。特に Pl が形成されていることは, かなり高温になったものと判断される。EPMA 積算化学組成では, Na (35), Fe+Mg (30) と多くなっており, Mn が (3.6) と極端に多くなっているのが特徴である。また, 黒色泥岩であるのに Si の値が 298 と大きな値を示す。

③-b 型 (Ab 生産型)

K75 (Bt 1 帯) : 純粋な石英 (10) < Im. 石英類 (14) であり, 量的にも少ないので, 中間型と認定した。Pl (4) と少ないのに, Ab (24) と特別に増加しているのが特徴である。EPMA 積算化学組成では Si が 298 と多くなっている。Na が 41 と多くなっており, Na 系の熱水の特徴と判断された。

3-6 関東山地四万十帯ホルンフェルス中の流体の分類

前章では石英のモードに基づき変成流体相の分類を行ったが, ここでは甲府深成岩体に由来するホルンフェルス中の流体を, EPMA 積算化学組成値を用いて分類すると, 表 7 に示すように, 5 種類の流体に識別できる。それを仮に, 高 Na 流体 (2 例), 高 K 流体 (3 種), 高 Si 流体 (2 例), 高 Ca 流体 (2 種), 混合流体 (2 種) と呼び, 以下のように特徴をまとめた。

1) 高 Na 流体 (①-a 型)

Na の値が 48~63 と格別に大きく, しかも X_{Na} が 0.77~0.79 と高い値を示す。Fe+Mg も比較的大きく 31~40 を示すのが特徴である。Pl が 48~66 と大きな値を示し, この Pl の存在から

表 7 関東山地のホルンフェルス中に見出した流体の区分

Fluid Flow	Loc	Si	Mn	Ca	Na	K	Fe+Mg	X_{Al}	X_{Na}	Pl (%)	Type
High-Na Fluid Flow	M18	265.67	0.2	14.9	62.5	16.6	31.5	0.29	0.79	66	①-a
	M411	258.42	0.8	21.8	47.9	14.1	40.6	0.31	0.77	48	①-a
High-K Fluid Flow	K39	265.93	0.2	12.4	30.4	33.8	29.2	0.32	0.47	30	①-b
	C35	274.46	0.3	3.9	20.7	41.3	35.3	0.29	0.33	12	①-c
	M29	246.18	0.4	8.9	28.4	38.9	45.5	0.36	0.42	9	①-d
High-Si Fluid Flow	K9-6	296.69	0.3	15.8	30.4	12.1	24.6	0.21	0.71	29	②-a
	K692	325.75	0.2	8.6	36.9	5.4	18.4	0.17	0.87	35	②-a
High-Ca Fluid Flow	K26	228.43	0.6	50.4	19.3	10.1	81.4	0.26	0.66	22	②-b
	C261	336.41	0.2	23.1	23.1	9.7	9.8	0.13	0.71	7	②-b
Mixed Fluid Flow	K86	297.81	3.6	8.9	35.3	13.6	29.6	0.22	0.72	14	③-a
	K75	297.79	0.4	9.6	40.7	14.1	29.5	0.23	1.82	4	③-b

高温の流体であったと見る事が出来る。この例は、M18, M411である。

2) 高 K 流体 (①-b 型, ①-c 型, ①-d 型)

K が 34~41 と最高値を示すのが特徴である。従って、 X_{Na} は 0.3~0.4 と低い値を示す。Fe+Mg は 29~45 と高い値を示す。Pl が 9~30 と幅広い値を示すが、(①-a 型) ほどには高温ではなかった。 X_{Al} は 0.29~0.36 と (1 型) と同じ傾向である。なお、この K 値が K39 では Pl (30) に入り Pl 生産型 (①-b 型) となり、C35 では Kfs (29) に入り Kfs 生産型 (①-c 型) となり、M29 では白雲母 (41) に入り Ms 生産型 (①-d 型) となったものと考えられる。なお、K の富化に関して従来は閉鎖系で考えるのが一般であるが、産状で述べたように周囲に比べその地点だけが石英を特別に消費していることから、K が流体の形で供給されたため石英に他の元素も参加して変成鉱物を作ったと考える開放系の考察を行った。

3) 高 Si 流体 (②-a 型)

流体に珪酸 SiO_2 が含まれていたことは、石英生産型の産状から判断される。 X_{Al} が 0.21~0.17 と低い値を示すことから、もともと地域全体が砂質の環境であったとも考えられるが (表 4-a, b), それだけの理由では石英の生産は説明できない。Na (30~37) や Pl (29~35) が大きな値を示すことから、珪酸を含む熱水流体の影響があったものと判断される。 X_{Na} は 0.71~0.87 と大きいのに、Fe+Mg は比較的に低く 18~24 を示す。Na (30~37), Fe+Mg (18~24) の組み合わせと、Pl (29~35) の値から、比較的に高温な状態であったと判断される。この例は K9-6, K692 にみられる。

4) 高 Ca 流体 (②-b 型, ②-c 型)

Ca (23~50) 富化の流体で、Na (19~23) は著しく低い値を取る。K26 と C261 にみられる流体であるが、上記の低い値は Ca が卓越する環境での変化と読みとれる。Pl も 7~22 と小さな値を示すのが特徴である。K26 は Pl (22) から判断してやや高温の環境で、Ca は岩体中に浸透してアパタイトを形成したものと判断される。このタイプを ②-b 型と呼ぶ。これに対して、C261 は Pl (7) と低温で Ca は細脈として存在している。このタイプを ②-c 型と呼ぶ。

5) 混合流体 (③-a 型, ③-b 型)

高 (Na+Mn) 流体としては、K86 に示されるように Mn (3.6) と異常値を示す。Na (35.3) も多いのが特徴であるが、Na 流体とはいえない。 X_{Al} 値が Na 流体より低い。Fe+Mg (29.6) の組み合わせは、②-a 型と似ているが、Pl は (14) とやや低温となる。このタイプを ③-a 型と呼ぶ。

高 (Si+Na) 流体としては、K75 に見られるように、Si (298) と Na (41) と大きな値を示し、かつ Ab (24) が Bt 1 帯に異常に出現する。他の地域では Bt 2 帯に Ab が見られることから、この変成分帯枠を越える Ab の出現は、Na 系の変成流体の存在が原因と考える。このタイプを ③-b 型と呼ぶ。

3-7 物質移動に関する議論

相馬ら (1996) の解説によると、アパラチア変成帯の全岩分析のデータでは、一般的な傾向として、低変成度変成岩では SiO_2 , H_2O , CO_2 含有量が比較的に高くなることが知られている。一方、高変成度変成岩では Al_2O_3 , CaO , Na_2O 含有量が高くなる傾向を示すという (Shaw, 1956)。この間に volatiles 成分が 5 wt% 程度流出するという。

さらに、原岩がマフィック性の場合に、緑色片岩層に相当する温度・圧力下では、 FeO , MgO , Na_2O , K_2O などが選択的に移動しやすいという (Pearce, 1976)。また、角閃岩相に相当する温度・圧力下では、 SiO_2 , CaO , Na_2O などが移動しやすいという (Rollinson, 1993)。

このように元素組成の違いが見られるのであるが、それが何によるのか問題である。その違いは、まず、1) 変成作用での物質移動の結果であるのか (交代作用)。2) あるいは原岩組成の変成反応によるふらつきによるのか (等化学的な変成反応)。3) または、他の理由で説明可能であるかという選択が考えられる。

交代作用の定義は、変成作用の過程で元素移動が生じて、全岩化学組成が変化する現象である。しかし、1) どのような交代作用がおきているか。2) 変成作用のどの時期に起きているか。3) どのような広がりで見起きているか。4) どのような機構で起きているか、などを明確にしなければならぬ (相馬ら, 1996)。

そこで、1) に関しては、3-5 章の変成流体相でまとめたが、筆者らは石英のモードにもとづき分類した。石英に着目して Xu et al. (1994) はオーストラリアの Stawell ホルンフェルスについて石英を持つグループと石英を持たないグループを区別し、黒雲母+石英+水と、黒雲母+カリ長石+水の組み合わせからの組成図を提唱している。この論文では交代作用を議論していないので、石英の有無は原岩の相違ということになる。

2) 変成作用のどの時期に起きているかに関しては、いずれの地点についてもホルンフェルスの変成分帯を越えるような変化は生じていないので、徳和花崗閃緑岩の貫入時期 12~7 Ma (Ito et al., 1989, 角田ほか, 1992) に同時的に、流体活動は発生したと考えている。つまりこれらは花崗閃緑岩に由来する流体である。なお、Walther and Orville (1982) によると、マグマの貫入などにより局地的に熱流量が $2.5 \text{ H. F. U. } (\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ に上昇した場合に、3 km の厚さの地層 (ホルンフェルスの厚さ) の変成反応に要する時間は最低でも 1.4 my 程度は掛かるという。この程度の経過時間のスパンは当然考慮しておかねばならないと思われる。

3) どのような広がりで起きているかに関しては、サンプリングの隣接地点を越えて流体影響の跡は認められないことから、数m～数100 m以下のごく小規模の流体であったとみられる。しかし、Pl（オリゴクレス）化が進んでいる地点が認められる事実から考えると、小規模ながらかなり高い熱流量であったものと判断される。

4) どのような機構で起きているかに関しては、現時点では十分な考察を行っていないので、今後の検討にまかせたい。しかし、多くの研究者は流体が pervasive grain edge flow であるより、効率の良い hydrofracture flow によって生じたものと考えている（Walther and Orville, 1982）。野外観察では、それを支持する vein や microcrack が確認される。

4. ま と め

本研究では、EPMA 分析の鉱物同定を行うに際して、通常のスチキオメトリーをとるものは、wt%の合計値が正常の範囲を±10%以下に限り認めることにより、不純物を含んだ鉱物として認定することにした。こうすることにより、殆ど全ての測定値を捨てることなく使うことができるようになった。この考えに立てば、線分析の積算値は、結晶した物質の総和として使えることになるので、これを積算化学組成値と呼び、利用することにした。結晶物質と非晶質の総和である全岩化学組成値とは若干異なるが、ホルンフェルスの場合、Si や Al は殆ど誤差のうちで違いはなく、Na や K でも 10%台の差で問題はないと考えている。

実例として、各種鉱物のモード変化を検討する。まず、石英では、変成帯という相平衡が保たれている中での消長をみると、変成度が進むと共に消費される傾向が認められた。泉水谷や小菅川のように泥岩卓越地域では、Bt 2 帯で Im. 石英類が最多となる。それが小菅川でみられるように Bt 1 帯で純粋な石英が最多となる。Crd 帯では両谷とも純粋の石英は Bt 1 帯と同じ程度の量を示しているが、Im. 石英類は最低となる。そして、Grt 帯において全石英類は最小となる変化を示している。この石英の変化は、変成に伴って変動しているのであって、原岩の組成の違いではない。表 4-c, 4-d の積算化学組成値に見られるように Si は Bt 2 帯での 342～335 afu から、Grt 帯での 258～265 afu へと変化しているが、この組成変化は石英モードの激甚な変化に比べ穏やかなものである。つまり原岩組成の変化はあまり大きなものではなかったと考えられる。

長石類の変化は、Bt 2 帯で Ab（アルバイト）が卓越し、Bt 1 帯で Or（微斜長石）、Crd 帯で Kfs（カリ長石）、Grt 帯で Pl（オリゴクレス斜長石）が卓越する。この変化は白雲母—パラゴナイト系原岩の熱水合成実験（飯山, 1964 in 1994）や変成作用にともなう鉱物共生の現象（Spear et al., 1983）によって説明される。本地域では、オリゴクレス化が顕著にみられたが、このことが Al を使ってしまう、いわゆるアルミ鉱物（ Al_2SiO_5 ）の出現を妨げたという見方も可能であるかも知れない。

その他の変成鉱物類のモード変化をみると、Bt 2 帯までは数%~10%台であるのに、Bt 1 帯で 21~33%と急増している。この変化は層状珪酸塩鉱物の緑泥石の消長と極めてよく一致しているし、また EPMA 分析された緑泥石の変化とも対応している。Bt 1 帯では白雲母>黒雲母がピークを作って卓越鉱物となっている。Crd 帯においては堇青石が 4~11%とピークを作るが、このアルミ鉱物の出現は、アルミ-アルカリ指数 (A/CNKcum) が Crd 帯でピーク値を取る分布と関係がある。なお、この指数の絶対値が低いことが関東山地で Al_2SiO_5 鉱物が産出しない原因と考える。また、Grt 帯では少量のザクロ石が産出するが、モードとしての卓越鉱物は黒雲母で 5~13%を示している。

モードを新たに決めることにより、共生鉱物や、変成分帯が再検討され、それに基づく反応関係が示された。これらはいずれも等化学的変成反応の成果である。

これに対して、積算化学組成値が局地的に大きく変化していることから、物質移動が生じていると思われる地点が見られた。それはホルンフェルスの 51 地点中 11 地点に達した。石英のモードを基準にして分類すると 3 つの変成流体相が識別された。石英消費型変成流体相は Bt 1, Crd, Grt の各帯に産し、Pl 生産型, Kfs 生産型, Ms 生産型に分かれる。石英生産型変成流体相は Bt 2, Crd, Grt の各帯に産し、Pl 共存型, Ca 付加 1 型, Ca 付加 2 型が認められた。また、中間型変成流体相は Bt 1 帯に産し、Mn 付加型, Ab 生産型が認められた。

最後に、筆者らが使っている EPMA 装置の制約から、炭質物や硫黄化合物に関しては識別できなかったが、関東山地四万十帯における流体は 5 種類あり、高 Na 流体, 高 K 流体, 高 Si 流体, 高 Ca 流体, および混合流体であった。

謝 辞

本研究を進めるに際して、多くの方々から種々の援助をえた。

飯能礫層研究グループの岡野裕一、力田正一、松本昭二の諸氏、ならびに関東平野西縁丘陵団体研究グループの倉川博、大沢進の諸氏にはお世話になった、心からお礼を申し上げる。元城西大学学生の菅谷勝則氏には野外調査を手伝ってもらった。

EPMA 分析に関しては、東京大学海洋研究所の石井輝秋氏に大変お世話になり、心から感謝する。この分析は海洋研の共同利用プログラム No. 40 (1997 以降) によったが、その間に同研究所の佐藤暢 (現専修大学理系研究室)・町田嗣樹氏にお世話になった。

粉末法 X 線回折分析に関しては、城西大学理学部化学教室の日原五郎、宮前博氏にお世話になった、記して感謝の意を表す。

石英カソードルミネッセンス画像に関しては Oregon 大学の Sam Boggs 先生に教えていただいた。

関東山地のホルンフェルス情報に関しては、日本大学文理学部地球システム科学科小坂和夫氏

に教えていただいた。防災科学技術研究所の松田達生氏には広瀬花崗閃緑岩に伴う斑状変晶の分布に関する未公表資料を見せていただいた。甲府花崗岩類の地質や化学組成に関しては山梨大学教育人間科学部自然科学科地学教室の角田謙朗氏に多くの文献を見せていただいた。京都大学理学部地質学鉱物学教室の小畑正明氏・尾崎淳氏、総産研の奥山康子氏、湯浅真人氏、岡山大学理学部地球科学科の浅見正雄氏には変成岩関係の文献を頂いた。東北大学名誉教授の蟹澤聰史氏には助言を頂いた。以上の方々に記して感謝の意を表す。

この研究に要した費用は、城西大学教官研究費と実験実習費の一部を使った。記して感謝の意を表す。

引用文献

- Barbey, P., C. MariGrtnac, J. M. Montel, J. Macaudiere, D. Gasquet and J. Jabori (1999) Cordierite growth textures and the conditions of genesis and emplacement of crustal granitic magmas: The Velay granite complex (Massif central France). *J. Petrol.*, 40, 1425-1441.
- Breaks, F. W. and J. M. Moore, Jr. (1992) The Ghost Lake batholith, Superior Province of northwestern Ontario: A fertile, S-type, peraluminous granitoid-element pegmatite system. *Canadian Mineralogist*, 30, 835-875.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1982) An Introduction to The Rock-Forming Minerals. Longman, Harlow, England, 528p.
- Ferry, J. M. (1988) Infiltration-driven metamorphism in Northern New England, USA. *J. Petrol.*, 29, 1121-1159.
- 平岡義博 (1996) 全岩および鉱物化学組成値を用いたモード (重量%) 分析—比叡・比良・鞍馬の花崗岩質岩石を例に—。岩鉱, 91, 123-132.
- 飯山敏道・河村雄行・中嶋 悟 (1994) 実験地球化学。東京大学出版会, 223p.
- Ikeda, T. (1998) Progressive sequence of reactions of the Ryoke metamorphism in the Yanai district, southwest Japan: The formation of cordierite. *J. metamorphic Geol.*, 16, 39-52.
- 池田 剛 (1992) 領家帯における堇青石生成反応。月刊地球, 14, 705-709.
- Ito, H., R. B. Sorkhabi, T. Tagami and S. Nishimura (1989) Tectonic history of granitic bodies in the South Fossa Magna region, central Japan: new evidence from fission-track analysis of zircon. *Tectonophysics*, 166, 331-344.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (1998) 関東山地の四万十帯のホルンフェルス—塩山市落合付近の産状と変成鉱物の化学組成—。城西大学研究年報 (自然科学編), 22, 23-74.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (1999) 関東山地の四万十帯のホルンフェルス—塩山市一之瀬付近の産状と変成鉱物の化学組成—。城西大学研究年報 (自然科学編), 23, 1-56.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (2000) 関東山地の四万十帯のホルンフェルスⅢ—塩山市落合付近の泥質岩変成鉱物の産状と化学組成—。城西大学研究年報 (自然科学編), 24, 11-47.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (2001) 関東山地の四万十帯のホルンフェルスⅣ—塩山市泉水谷の泥質岩変成鉱物の産状と化学組成—。城西大学研究年報 (自然科学編), 25, 1-37.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (2002) 関東山地の四万十帯のホルンフェルスⅤ—北都留郡小菅谷の泥質岩変成鉱物の産状と化学組成—。城西大学研究年報 (自然科学編), 26, 1-45.
- 加賀美英雄・谷口英嗣 (2003) 関東山地四万十帯ホルンフェルスの鉱物・化学組成の特徴。日本第四紀学会講演要旨集, 33, 136-137.

加賀美英雄・谷口英嗣（印刷準備中）

Mahar, E. M., J. M. Baker, R. Powell, T. J. B. Holland and N. Howell (1997) The effect of Mn on mineral stability in metapelites. *J. metamorphic Geol.*, 15, 223-238.

Manias, P. D. and P. M. Piccoli (1989) Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101, 635-643.

Mather, J. D. (1970) The biotite isograd and the lower greenschist facies in the Dalradian rocks of Scotland. *J. Petrol.*, 11, 253-275.

村田明広・小坂和夫・狩野謙一（1986）甲府深成岩体との関係からみた鶴川断層の活動時期. 地質学雑誌, 92, 12, 905-908.

長橋良隆・吉田武義・中井綾子・奥平敬元（2003）XRF 分析の比較によるテフラガラス片の EDS 分析結果の評価と補正. 第四紀研究, 42, 265-277.

Pattison, D. R. M. and Harte, B. (1991) Petrography and mineral chemistry of pelites. in Voll, G. et al., ed., Equilibrium and Kinetics in Contact Metamorphism. Springer-Verlag, Berlin, 135-179.

Pearce, J. A. (1976) Statistical analysis of major element patterns in basalts. *J. Petrol.*, 17, 15-43.

Rollinson, H. R. (1993) Using Geochemical Data; Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, Harlow, England, 352pp.

酒井 彰（1987）五日市地域の地質. 地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅）. 地質調査所, 75p.

Shaw, D. M. (1956) Geochemistry of pelitic rocks. Part III: Major elements and general geochemistry. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 67, 919-934.

Shimizu, M. (1986) The Tokyuwa Batholith, Central Japan. University Museum Bull., Tokyo University, 28, 146pp.

相馬恒雄・梶座圭太郎・後藤 篤（1996）液体相から眺める変成作用と交代作用：飛騨変成作用を理解するために. 富山県「立山博物館」委託研究報告書, 31pp.

Spear, F. S., M. J. Kohn, F. P. Florence and T. Menard (1991) A model for garnet and plagioclase growth in pelitic schists: Implications for thermo-barometry and P-T path determinations. *J. metamorphic Geol.*, 8, 683-696.

角田謙朗・西戸裕嗣・清水正明（1992）甲府盆地周縁の花崗岩類に伴う鉍床の K-Ar 年代. 資源地質, 42, 147-153.

Walther, J. V. and P. M. Orville (1982) Volatile production and transport in regional metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 79, 252-257.

Xu, G., R. Powell, C. J. L. Wilson and T. M. Will (1994) Contact metamorphism around the Stawell granite, Victoria, Australia. *J. metamorphic Geol.*, 12, 609-624.

山梨県地質図編集委員会（1970）山梨県地質図, 2 葉, 1: 100,000.

Yuasa, M. (1976) Contact metamorphic aureole around the Kaikoma-Hoo granodiorite pluton in the northern part of Akaishi Mountains, Central Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Pet. Econ. Geol.*, 71, 157-176.

Mode of Quartz Occurrence and Cumulative Chemical Composition of Minerals of the Shimanto Hornfels in the Kantou Mountains Indicating Metamorphic Fluid Flow Facies

Hideo KAGAMI¹⁾ and Hidetsugu TANIGUCHI²⁾

Abstract

The data of minerals by EPMA analyses deviating from 100% total were used to abandon by now. We allow impure minerals with $\pm 10\%$ different from total and include them into mode of occurrence. Thus, we can utilize almost all EPMA data for mode calculation and also EPMA cumulative chemical composition to substitute whole rock chemical composition.

Variation of mode of quartz families, which are composed of pure quartz + impure quartz, reveals maximum percent of impure quartz in Bt 2 (Biotite-chlorite) zone in mudstone dominant areas such as Sensui Valley and Kosuge River. Pure quartz becomes dominant in Bt 1 (Biotite) zone. Impure quartz becomes minimum in Crd (Cordierite) zone. Finally, quartzes become null in Grt (Garnet) zone. Consumption of quartzes is compensated by growth of other minerals.

Variation of feldspar mode starts with dominance in albite in Bt 2 zone. Microcline becomes dominant in Bt 1 zone. Kali-feldspar reaches maximum in Crd zone and finally oligoclase is dominant in Grt zone.

Variation of other minerals starts with a few $\sim 10\%$ muscovite + biotite in Bt 2 zone. Muscovite and biotite become dominant (21 \sim 33%) in Bt 1 zone. In this process, Fe + Mg are supplied from breaking down of layered silicate (chlorite). Then, cordierite becomes dominant (4 \sim 11%) in Crd zone, and biotite becomes dominant (5 \sim 13%) in Grt zone.

As mentioned above, the study on mode of occurrence clarifies metamorphic mineral assemblages in each metamorphic zone. Mineral abundance is thus obtained and shown in the descending order.

Bt 2 Zone: chlorite + muscovite + biotite + quartz \pm albite

Bt 1 Zone: microcline + quartz + muscovite + biotite

Crd Zone: kali-feldspar + quartz + cordierite + muscovite + biotite

Grt Zone: oligoclase + biotite + muscovite + cordierite \pm garnet

Abundant (35 \sim 45%) oligoclase in Grt zone consumes available Al in equilibrium condition. This is a part of the reason why alumi-minerals (Al_2SiO_5) are not found in the Kantou Mountains, although aluminum contents itself is scarce originally.

EPMA cumulative chemical composition reveals transport of elements in 11 sites out of 51 sites examined. Three groups of the metamorphic fluid flow facies are proposed on

the basis of quartz mode. (1) Metamorphic fluid flow facies of quartz consumption is composed of plagioclase growth type, kali-feldspar growth type, and muscovite growth type. (2) Metamorphic fluid flow facies of quartz production is composed of plagioclase growth type and calcium addition type. (3) Metamorphic fluid flow facies in between groups (1) and (2) is composed of Mn addition type and albite growth type.

There are recognized five kinds of fluid flows at hornfels zones in the Kantou Mountains. They are high-Na fluid flow, high-K fluid flow, high-Si fluid flow, high-Ca fluid flow, and mixed type.

1) Institute of Geology, Faculty of Science, Josai University
2) Komazawa University High School