

富山県立山川 (早月川上流) 域の 飛驒変成岩の変成温度について

藤 吉 瞭*

Metamorphic Temperatures Estimated from Cordierite-garnet and Garnet-biotite
Geothermometry for the Hida Metamorphic Rocks along the
Tateyama-gawa in the Upper Hayatsuki-gawa Area

Akira FUJIYOSHI*

The Hida metamorphic rocks along the Tateyama-gawa have undergone regional metamorphism and migmatization related to leuco-granites, and are characterized by the mineral assemblages of cordierite-garnet-biotite, orthopyroxene-biotite, spinel-corundum-biotite, andalusite-cordierite-sillimanite-orthoclase for pelitic gneisses, and of clinopyroxene-biotite-hornblende for basic gneiss. These mineral assemblages and Ti contents of hornblende suggest that metamorphism in the area belongs to the transitional zone of the amphibolite-granulite facies.

Using the cordierite-garnet and garnet-biotite geothermometry, the metamorphic temperatures of two rock samples (cordierite-garnet-biotite gneiss and garnet-biotite gneiss) were determined.

The metamorphic temperatures of the cordierite-garnet-biotite gneiss were estimated at 610–650°C by cordierite-garnet and garnet-biotite geothermometry, and those of the garnet-biotite gneiss 700–780°C by garnet-biotite geothermometry.

The metamorphic temperatures of 700–780°C might correspond to an earlier stage of metamorphism characterized by spinel, corundum, Mg-rich garnet and others; the metamorphism of 610–650°C might have been caused by migmatization related to leuco-granites, and is characterized by andalusite and cordierite.

1. はじめに

早月川上流地域の立山川上流に広く分布する片麻岩類は、黒部川下流地域の ISHIOKA and SUWA (1956) によるエボシ山グループと名付けられ、その後 HIROI (1983) によって宇奈月川グループとされた結晶片岩類の南への延長と考えられる。そこには、

ざくろ石-堇青石-黒雲母, 紅柱石-珪線石-堇青石-正長石, スピネル-堇青石-黒雲母, 斜方輝石-黒雲母等の特徴的鉱物組み合わせをもつ泥質片麻岩が存在する(藤吉, 1973)。これらの鉱物で表わされる当地域の変成温度を知るために、電子プローブ・マイクロアナライザー (EPMA) により堇青石・ざくろ石・黒雲母の分析を行ない、変成温度・圧力を堇

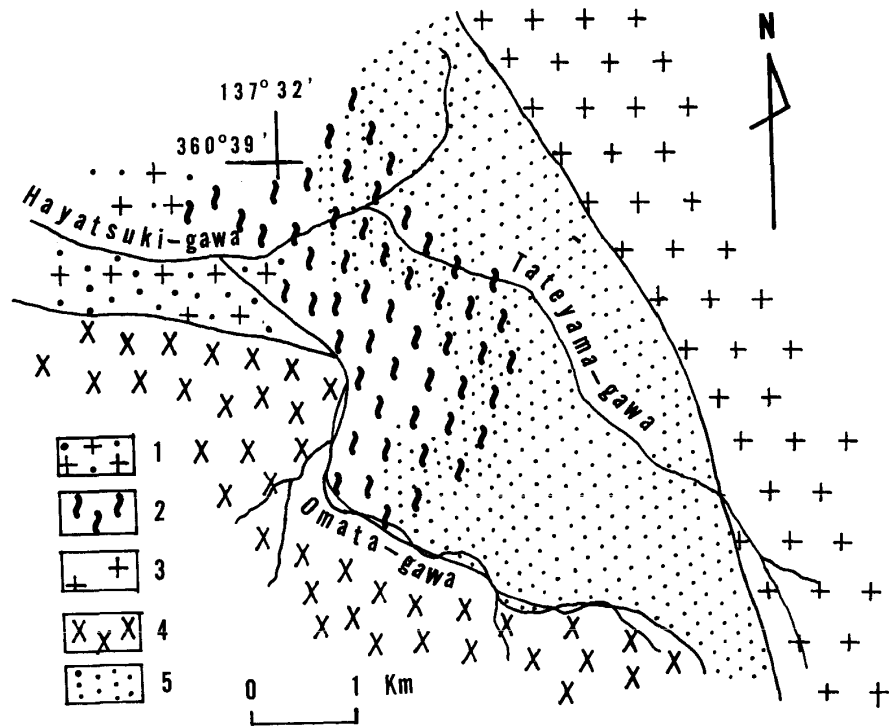


図1 早月川上流地域の地質図(FUJIYOSHI, 1970).

1: アダメロ岩, 2: 眼球片麻岩類, 3: 毛勝岳花崗岩, 4: 大熊山花崗閃緑岩, 5: 古期片麻岩

青石・ざくろ石の温度・圧力計およびざくろ石・黒雲母の温度計から求めた。また、当地域の変成度をより明確にするため、さらに角閃石片麻岩中の角閃石、輝石、泥質片麻岩中の輝石の分析を行なった。以下はその報告である。

2. 地質概略

早月川上流地域の飛驒変成岩類は、古期片麻岩、眼球片麻岩、貫入岩から成る(図1)。

古期片麻岩は岩相により次のように分類される。すなわち、大理石または石灰質片麻岩、泥質片麻岩、角閃石片麻岩、泥質・塩基性・石英長石質片麻岩の互層、レプタイトまたはレプタイト源片麻岩。これら片麻岩の層序は、下部から(1)大理石または石灰質片麻岩(I)、(2)泥質片麻岩、(3)大理石または石灰質片麻岩(II)、(4)角閃石片麻岩、(5)大理石または石灰質片麻岩(III)、(6)泥質・塩基性・石英長石質片麻岩の互層、(7)レプタイトまたはレプタイト源片麻岩、角閃石片麻岩(II)、大理石または石灰質片麻岩(IV)である(FUJIYOSHI, 1970)。片麻岩には優白質花崗岩が注入または貫入している。

優白質花崗岩は、主に石英・カリ長石・斜長石から成り、立山川下流では片麻岩の優白縞と密接に関係し、片理に平行かまたはやや斜交した幅数mm～数cm脈として存在する。立山川上流では幅数十cm～数mのプール状・岩脈として多量に存在し、一部は泥質片麻岩と漸移関係にある。片麻岩の粒度は立山川下流から上流に向かって細粒のレプタイト(片岩)から細粒片麻岩を経て、中・粗粒片麻岩へと漸移する。変成度を鋭敏に示すホルンブレンドのz軸色は、同じく立山川下流から上流へと青緑色から緑色、緑褐色へと変化する。これらの事実は、古期片麻岩の変成度が立山川下流から上流へと増加し、またこの変成作用と優白質花崗岩が密接に関係することを示す。

古期片麻岩は、立山川上流では次のような特徴的な鉱物組み合わせを含む。即ち、泥質片麻岩ではスピネルー銅玉ー黒雲母ー斜長石、斜方輝石ー黒雲母ー斜長石、堇青石ーざくろ石ー黒雲母ー斜長石、珪線石ー紅柱石ー堇青石ー黒雲母ーカリ長石ー斜長石ー石英、石灰質片麻岩では方解石ー単斜輝石ーざくろ石ー珪灰石、角閃石片麻岩では単斜輝石ー緑褐色ホルンブレンドー黒雲母ー斜長石。

古期片麻岩は、東部の毛勝岳花崗岩の貫入に伴う低変成度の後退変成作用を受けた。これは、緑れん石、ブドウ石、珪灰石の仮晶に生成した方解石・石英および緑褐色角閃石の緑の青緑色角閃石等によって特徴づけられる (FUJIYOSHI, 1970)。

古期片麻岩は、立山川下流域では、アダメロ岩体貫入に密接に関係するカリ交代作用によって眼球片麻岩に変化している (FUJIYOSHI, 1970)。片麻岩類は当地域では三つの花崗岩—大熊山花崗閃緑岩、毛勝岳花崗岩、アダメロ岩体に貫入されている (図1)。

3. 分析岩石の記載

分析岩石は、下部の泥質片麻岩(2)と上部の互層(6)中の泥質片麻岩から多くの岩石を採取し、顕微鏡下で堇青石・ざくろ石・黒雲母またはざくろ石・黒雲母が共存し、しかも後の後退変成作用をあまり受けていない部分の存在する岩石をさがした。分析した岩石は下部泥質片麻岩からのもので、一つは、堇青石・ざくろ石・黒雲母の共存する岩石 (2909A) であり、もう一つは、ざくろ石・黒雲母の共存する岩石 (2903C) である。

2909A は主に斜長石、黒雲母、石英、不透明鉱物から成り、後の後退作用の影響は部分により異なる。後の後退変成作用を受けた部分では、堇青石はピナイト化し、黒雲母は緑泥石化している。2903C は斜長石、黒雲母、ざくろ石、不透明鉱物から成り、同じく後の後退変成作用を受けた部分は黒雲母は緑泥石化し、また一部斜長石はソーシユール石化している。これらの試料に対して、ほとんどピナイト化していない堇青石および緑泥石化していない黒雲母が存在する部分で、しかも堇青石・ざくろ石・黒雲母または黒雲母・ざくろ石が共存する部分で各結晶について EPMA 分析を行なった。

大理石または石灰質片麻岩 (II) 中に存在する斜方輝石を含む泥質片麻岩 (0517) は二つの異なる部分から成っている。一つは斜方輝石・黒雲母・斜長石から成る比較的粗粒な部分であり、もう一つはスピネルまたはコランダム・黒雲母・斜長石から成る細粒の部分である。スピネルまたはコランダムは非常に細粒の集合体として存在する。

角閃石片麻岩層(4)からの角閃石片麻岩 (476) はマ

グネタイト・黒雲母・単斜輝石・ホルンブレンド・斜長石から成り、ホルンブレンドの z 軸色は緑褐色を示し、部分的に周縁部は青緑色を示す。

0517および476の岩石については黒雲母・輝石・角閃石の EPMA 分析を行なった。

4. 結果と考察

ざくろ石、堇青石、黒雲母、輝石、角閃石の EPMA 分析の結果はそれぞれ表 1-5 に示した。ざくろ石は累帯構造を示し、核は Mg 成分および Mg/Mg+Fe が増加し、Mn 成分が減少する。逆に周縁部は Mn 成分が増加し、Mg 成分および Mg/Mg+Fe は減少する。この累帯構造は、岩石 2903C のざくろ石で顕著にみられ、その 6 個のざくろ石の 27 個の分析の結果については、Mg/Mg+Fe 値は三つに別かれて分布する。即ち、4 個の高い値のもの (0.176-0.181)、19 個の中間のもの (0.136-0.162) そして低い値のもの (0.125-0.129) である。さらに中間の値のものの内、11 個は 0.149-0.158 である。

堇青石は顕著な累帯構造を示さないが、周縁部は、ASHWORTH and CHINNER (1978) に指摘されたように、Mg/Fe が大きくなる。黒雲母については、結晶により少し異なる Mg/Fe 値を示す。また泥質片麻岩中では輝石と共存する黒雲母が最も高い Ti 値を示す。泥質片麻岩 (0517) の斜方輝石は表 4 に示すように、Ferrohypersthene (En36.0 Fs62.8 Wo1.2) の組成を示し、角閃石片麻岩 (476) の単斜輝石は Salite (En26.5 Fs24.9 Wo48.6) の組成を示す。角閃石片麻岩 (476) 中の角閃石については、緑褐色の部分は高い Ti 値 (0.198-0.204) を示し、周縁部のものは低い Ti 値 (0.115-0.147) を示す。

共存する堇青石・ざくろ石・黒雲母 (2903C) とざくろ石・黒雲母 (2909A) から変成温度の見積りを試みた。当地域の変成岩は最初高温の変成作用を受け、後に毛勝岳花崗岩の貫入に伴う後退変成作用を受けている (FUJIYOSHI, 1970) ため、温度推定に用いた鉱物分析値は次のようである。ざくろ石に関しては、核の Mg/Mg+Fe 値の高いものの平均値を用いた。また、2903C 中のざくろ石については 11 個の Mg/Mg+Fe 値 (0.149-0.158) の平均値についても比較のため用いた。堇青石に関しては、周縁部の Mg/Fe 値の高

表1 さくろ石の EPMA 分析値

Sample No.	2909A										
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	A-1
SiO ₂	36.13	36.20	36.16	35.90	36.12	35.85	36.40	36.02	36.12	36.10	36.19
TiO ₂	-----	0.02	0.01	0.02	-----	0.01	-----	-----	-----	-----	-----
Al ₂ O ₃	20.20	20.29	20.24	20.15	20.22	20.29	20.23	20.26	19.78	20.22	20.20
FeO*	32.81	32.19	32.59	32.36	32.97	33.28	32.95	32.73	32.78	32.66	33.01
MnO	6.33	6.08	5.93	6.13	6.17	6.17	6.09	6.71	6.27	6.37	4.67
MgO	2.19	2.40	2.34	1.95	2.30	2.37	2.37	1.96	2.03	2.07	3.24
CaO	1.56	1.79	1.82	1.54	1.47	1.84	1.92	1.39	1.58	1.77	00.90
Na ₂ O	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
K ₂ O	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total	99.22	98.97	99.09	98.05	99.29	99.61	99.96	99.07	98.60	99.19	98.21
Number of cations (0 = 12)											
Si	2.975	2.978	2.975	2.986	2.975	2.951	2.974	2.974	2.995	2.974	2.986
Al	1.961	1.968	1.963	1.976	1.961	1.949	1.949	1.972	1.934	1.964	1.963
Ti	-----	0.001	0.001	0.001	-----	0.001	-----	-----	-----	-----	-----
Fe	2.260	2.215	2.243	2.251	2.268	2.291	2.251	2.260	2.995	2.250	2.278
Mn	0.442	0.424	0.413	0.432	0.430	0.430	0.421	0.469	0.440	0.445	0.326
Mg	0.269	0.294	0.287	0.242	0.282	0.291	0.289	0.241	0.251	0.254	0.398
Ca	0.138	0.158	0.160	0.137	0.130	0.162	0.168	0.123	0.140	0.156	0.080
Mg/Mg + Fe	0.106	0.117	0.113	0.097	0.111	0.113	0.114	0.096	0.077	0.101	0.149
100 X _{Fe}	72.7	71.1	72.3	73.5	72.9	72.2	71.9	73.1	78.3	72.5	73.9
100 X _{Mn}	14.2	113.7	13.3	14.1	13.8	13.5	13.5	15.2	11.5	14.3	10.6
100 X _{Mg}	8.7	9.5	9.2	7.9	9.1	9.2	9.2	7.8	6.6	8.2	12.9
100 X _{Ca}	4.4	5.1	5.2	4.5	4.2	5.1	5.4	4.0	3.7	5.0	2.6

Sample No.	2903C										
	A-2	A-3	A-4	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3	D-1	D-2	D-3
SiO ₂	36.37	A-3	36.44	36.57	36.72	36.46	36.71	36.62	36.61	36.24	36.31
TiO ₂	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Al ₂ O ₃	20.52	20.70	20.70	21.09	20.62	20.42	20.35	20.72	20.61	20.13	20.38
FeO*	32.69	32.79	32.79	32.46	32.29	33.54	32.62	32.72	32.62	31.50	32.36
MnO	4.05	3.96	4.42	4.33	4.39	4.95	4.17	4.24	5.07	6.09	5.76
MgO	3.44	3.92	3.33	3.87	3.49	3.08	3.50	3.32	3.31	2.97	3.40
CaO	0.89	0.93	0.93	0.90	1.36	0.88	0.93	1.52	0.99	2.03	1.00
Na ₂ O	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
K ₂ O	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total	97.96	98.74	98.74	98.77	98.87	99.33	98.28	99.14	99.21	98.96	99.21
Number of cations (0 = 12)											
Si	2.992	2.973	2.980	2.982	2.992	2.980	3.008	2.981	2.984	2.975	2.969
Al	1.951	1.991	2.024	1.974	1.981	1.968	1.966	1.988	1.980	1.948	1.965
Ti	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Fe	2.249	2.237	2.212	2.183	2.200	2.293	2.236	2.228	2.223	2.163	2.213
Mn	0.282	0.274	0.305	0.300	0.303	0.343	0.289	0.292	0.350	0.423	0.399
Mg	0.422	0.477	0.404	0.472	0.424	0.375	0.427	0.403	0.402	0.363	0.414
Ca	0.078	0.081	0.079	0.120	0.119	0.077	0.082	0.133	0.086	0.179	0.088
Mg/Mg + Fe	0.158	0.176	0.154	0.178	0.162	0.141	0.160	0.153	0.153	0.144	0.158
100 X _{Fe}	74.2	72.9	73.7	71.0	72.2	74.3	73.7	72.9	72.6	69.1	71.1
100 X _{Mn}	9.3	8.9	10.2	9.8	9.9	11.1	9.5	9.6	11.4	13.5	12.8
100 X _{Mg}	13.9	15.5	13.5	15.3	13.9	12.1	14.1	13.2	13.1	11.6	13.3
100 X _{Ca}	2.6	2.6	2.6	3.9	3.9	2.5	2.7	4.4	2.8	5.7	2.8

FeO*: 全 Fe 量を FeO として計算した. A, B, C, D, E, F はそれぞれ異なる結晶を示し, A-1, A-2, A-3……は同一結晶中の異なる位置の測定を示す.

2903C										
D-4	D-5	D-6	D-7	D-8	E-1	E-2	E-3	E-4	F-1	F-2
36.19	36.42	36.65	36.55	36.39	36.75	36.26	36.10	35.51	35.56	36.56
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.03	-----
20.46	20.64	20.56	20.69	21.21	21.12	20.69	20.55	20.93	21.06	20.85
31.24	30.92	30.84	32.41	32.25	32.65	32.62	31.98	33.41	33.99	33.88
5.39	6.59	6.77	4.81	4.68	4.38	4.82	5.94	4.35	4.11	3.86
3.10	2.56	2.73	2.91	3.30	3.41	3.20	2.89	3.28	4.19	3.34
2.10	2.00	2.20	1.00	1.01	0.91	0.99	1.70	0.90	0.91	1.50
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
98.48	99.13	99.75	98.37	98.84	99.29	98.58	99.16	98.38	99.93	99.99
2.972	2.978	2.980	2.998	2.966	2.980	2.972	2.958	2.928	2.891	2.961
1.981	1.990	1.971	2.019	2.038	2.019	2.001	1.985	2.035	2.019	1.991
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.002	-----
2.146	2.115	2.099	2.224	2.198	2.214	2.238	2.192	2.304	2.311	2.295
0.375	0.456	0.466	0.334	0.323	0.301	0.335	0.412	0.304	0.283	0.265
0.379	0.312	0.331	0.356	0.401	0.412	0.391	0.353	0.403	0.508	0.403
0.185	0.175	0.192	0.088	0.088	0.085	0.087	0.149	0.080	0.079	0.130
0.150	0.129	0.136	0.138	0.154	0.157	0.149	0.139	0.149	0.180	0.149
69.6	69.2	68.0	74.1	73.0	73.5	73.4	70.6	74.5	72.7	74.2
12.2	14.9	15.1	11.1	10.7	10.0	11.0	13.3	9.8	8.9	8.6
12.3	10.2	10.7	11.9	13.3	13.7	12.8	11.4	13.0	16.0	13.0
6.0	5.7	6.2	2.9	2.9	2.8	2.9	4.8	2.6	2.5	4.2

2903C			
F-3	F-4	F-5	F-6
36.26	35.36	35.81	35.97
-----	-----	0.02	-----
20.82	20.85	20.57	20.64
33.69	32.32	32.14	33.23
4.41	4.67	5.95	5.78
3.14	3.05	2.58	2.75
1.64	2.19	2.09	1.96
-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----
99.96	98.38	99.16	100.33
2.964	2.914	2.943	2.930
1.994	2.029	1.993	1.982
-----	-----	0.001	-----
2.289	2.232	2.209	2.264
0.304	0.327	0.414	0.399
0.380	0.375	0.316	0.334
0.143	0.194	0.184	0.171
0.142	0.144	0.125	0.129
73.5	71.4	70.7	71.5
9.8	10.5	13.3	12.6
12.2	12.0	10.1	10.5
4.6	6.2	5.9	5.4

表2 董青石 EPMA 分析値

Sample No.	2909A					
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	46.72	46.32	46.49	47.11	46.36	45.97
TiO ₂	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Al ₂ O ₃	32.5	32.35	31.83	32.49	32.61	32.41
FeO*	10.61	10.69	10.61	10.26	10.37	10.42
MnO	0.49	0.62	0.56	0.54	0.58	0.56
MgO	6.68	6.52	6.71	6.75	6.70	6.55
CaO	0.03	0.07	0.05	0.03	0.06	0.07
Na ₂ O	0.21	0.18	0.14	0.18	0.13	0.21
K ₂ O	0.01	-----	-----	-----	-----	-----
Total	96.80	96.75	96.39	97.36	96.81	96.19
Number of cations (O = 18)						
Si	4.958	4.925	4.957	4.960	4.917	4.909
Al	4.010	4.055	4.011	4.032	4.077	4.080
Ti	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Fe	0.942	0.951	0.946	0.903	0.920	0.931
Mn	0.044	0.056	0.051	0.054	0.052	0.051
Mg	1.057	1.033	1.066	1.059	1.059	1.052
Ca	0.003	0.008	0.006	0.003	0.007	0.008
Na	0.043	0.037	0.029	0.018	0.027	0.043
K	0.001	-----	-----	-----	-----	-----
Mg/Mg+Fe	0.529	0.528	0.530	0.540	0.535	0.531

FeO*: 全 Fe 量を FeO として計算した。

いものを除いた Mg/Mg+Fe 値の平均を用いた。黒雲母に関しては、岩石中で共存していると思われる黒雲母の平均値を用いた。これらの分析値をもちいて、THOMPSON (1976), FERRY and SPEAR (1978) の方法を用いて変成温度を求めた。結果は表6のようである。表6に示すように、董青石・ざくろ石・黒雲母の共存する岩石 (2909A) については THOMPSON (1976) による董青石・ざくろ石、ざくろ石・黒雲母に関してそれぞれ 622°C, 613°C を示し、ざくろ石・黒雲母に関する FERRY and SPEAR (1978) の方法は高い値を示す。THOMPSON の方法で董青石・ざくろ石とざくろ石・黒雲母で非常によく一致した値を示すことはこの温度でこの岩石が一つの平衡状態になったことを示すのかも知れない。一方、ざくろ石・黒雲母の共存するもう一つの岩石 (2903C) においては、THOMPSON および FERRY and SPEAR の各方法において 2909A に比べて約 100°C 位の高温を示す。このことは、2909A から求められた変成温度は後の後退変成作用の影響の結果を示し、2903C からの変成温度がこの地域の広域変成作用の温度を示すのかも知れない。2903C の岩石のざくろ石は累帯構

造が顕著で、Mg/Mg+Fe 値に関して三つに別かれて分布し、その内多くが集中する 0.149-0.158 の値の平均値は 0.153 である。この値を用いて THOMPSON の方法で求められたざくろ石・黒雲母からの変成温度 (640°C) は、2909A (620°C) のものと類似の値を示す。このことに加えて、前に述べたように 2909A の岩石の変成温度が董青石・ざくろ石、ざくろ石・黒雲母の両方で非常によく一致することを考えると、この温度は単なる後の毛勝岳花崗岩の貫入に伴う後退変成作用の影響による中間値ではなくて、もう一つの変成作用の時期の変成温度を示すのかも知れない。

当地域の変成圧力の推定は、ONO (1977) の方法に従って求めた。2903C の共存する董青石・ざくろ石の分析値を用い、温度 622°C における圧力を求めた。結果は $P_{H_2O} = 1/2 P_s$ とした時 4.8Kb である。

低圧型の角閃岩相からグラニュライト相への漸移帯は、塩基性岩での豊富な単斜輝石 (ディオプサイド) の出現、泥質岩での白雲母の消失と珪線石・董青石・カリ長石の組み合わせによって特徴付けられ、グラニュライト相は角閃石・単斜輝石・斜方輝石・

表3 黒雲母のEPMA分析値

Sample No.	2909A				2903C					0517			
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4
SiO ₂	33.74	34.31	34.66	34.34	34.20	34.65	34.56	34.17	34.01	35.33	35.62	35.12	35.37
TiO ₂	3.46	2.82	3.30	3.41	3.40	3.34	3.15	3.34	3.28	4.26	4.41	3.22	3.52
Al ₂ O ₃	16.74	18.15	17.77	17.94	16.30	16.51	16.49	16.01	15.37	15.07	15.07	15.93	15.85
FeO*	23.57	23.36	23.09	22.82	21.80	21.59	22.00	21.97	22.26	22.57	22.06	22.58	22.31
MnO	0.15	0.09	0.15	0.10	0.12	0.10	0.16	0.15	0.16	0.14	0.15	0.13	0.10
MgO	7.52	7.89	7.40	7.45	9.13	9.27	9.16	8.90	8.93	9.35	9.50	9.28	9.30
CaO	0.02	0.03	0.07	0.07	0.06	0.02	0.08	0.04	0.09	0.15	0.08	0.10	0.09
Na ₂ O	0.05	0.14	0.16	0.19	0.16	0.21	0.19	0.21	0.16	0.16	0.12	0.09	0.14
K ₂ O	9.08	9.03	9.04	8.78	8.91	8.97	8.96	8.75	8.91	9.12	9.56	9.55	9.47
Total	94.33	95.82	95.64	95.10	94.08	94.66	94.74	93.54	93.17	96.15	96.57	96.00	96.15
Number of cations (0=22)													
Si	5.333	5.308	5.363	5.333	5.367	5.390	5.385	5.398	5.417	5.444	5.459	5.427	5.443
Al	3.119	3.310	3.242	3.284	3.016	3.028	3.028	2.982	2.886	2.738	2.723	2.902	2.876
Ti	0.411	0.328	0.384	0.398	0.401	0.391	0.369	0.397	0.393	0.494	0.508	0.374	0.409
Fe	3.116	3.023	2.988	2.969	2.861	2.809	2.867	2.903	2.965	2.908	2.827	2.918	2.871
Mn	0.020	0.012	0.020	0.013	0.016	0.013	0.021	0.020	0.022	0.018	0.019	0.017	0.013
Mg	1.771	1.810	1.707	1.724	2.135	2.148	2.127	2.095	2.120	2.147	2.170	2.137	2.133
Ca	0.003	0.005	0.012	0.012	0.010	0.003	0.013	0.007	0.015	0.025	0.013	0.017	0.015
Na	0.015	0.042	0.048	0.057	0.049	0.063	0.057	0.064	0.049	0.048	0.036	0.027	0.042
K	1.831	1.782	1.785	1.740	1.784	1.780	1.781	1.763	1.810	1.793	1.869	1.883	1.859
Mg/Mg+Fe	0.362	0.375	0.364	0.367	0.427	0.433	0.426	0.419	0.417	0.425	0.434	0.423	0.423

FeO*: 全Fe量をFeOとして計算した。

表4 輝石のEPMA分析値

Sample No.	517								476			
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4
SiO ₂	48.12	48.70	48.83	48.73	48.36	48.85	48.34	48.63	52.29	51.28	52.62	52.14
TiO ₂	0.09	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.10	0.16	0.10	0.07	0.08	0.01
Al ₂ O ₃	0.42	0.35	0.31	0.28	0.28	0.19	0.50	0.48	0.83	0.42	0.64	0.55
FeO	36.19	36.61	37.00	36.79	36.14	37.51	36.54	35.58	14.92	14.69	15.67	15.17
MnO	1.10	1.23	1.07	1.11	1.16	1.30	1.22	1.24	0.57	0.60	0.63	0.63
MgO	11.40	11.84	11.78	12.08	12.12	10.59	11.85	12.13	8.88	9.24	8.85	9.22
CaO	0.54	0.60	0.49	0.47	0.55	0.55	0.55	0.64	22.72	23.40	22.98	23.07
Na ₂ O	-----	0.02	0.02	-----	0.02	0.02	0.04	0.95	0.25	0.18	0.25	0.23
K ₂ O	-----	0.01	-----	0.01	-----	0.01	0.01	0.02	0.08	-----	0.02	0.01
Total	97.86	99.48	99.62	99.59	98.75	99.16	99.15	99.83	100.64	99.88	101.74	101.12
Number of cations (0=6)												
Si	1.980	1.972	1.975	1.971	1.970	1.992	1.965	1.960	1.998	1.982	1.996	1.988
Al	0.020	0.017	0.015	0.013	0.013	0.009	0.024	0.023	0.037	0.019	0.029	0.025
Ti	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.03	0.005	0.003	0.002	0.002	0.003
Fe	1.244	1.240	1.252	1.244	1.231	1.279	1.242	1.199	0.477	0.475	0.497	0.484
Mn	0.038	0.042	0.037	0.038	0.040	0.045	0.042	0.042	0.018	0.020	0.020	0.020
Mg	0.698	0.715	0.710	0.728	0.736	0.644	0.718	0.729	0.506	0.532	0.500	0.524
Ca	0.024	0.026	0.021	0.020	0.024	0.024	0.024	0.028	0.930	0.969	0.934	0.943
Na	-----	0.002	0.002	-----	0.002	0.002	0.003	0.074	0.019	0.013	0.018	0.017
K	-----	0.001	-----	0.001	-----	0.001	0.001	0.001	0.004	-----	0.001	-----
100 X _{Fe}	63.3	62.6	63.1	62.4	61.8	65.7	62.6	61.3	24.9	24.0	25.7	24.8
100 X _{Mg}	35.5	36.1	35.8	36.5	37.0	33.1	36.2	37.3	26.5	26.9	25.9	26.9
100 X _{Ca}	1.2	1.3	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.4	48.6	49.0	48.4	48.3

FeO*: 全Fe量をFeOとして計算した。

斜長石の組み合わせによって特徴付けられる (TURNER, 1968). 当地域の泥質片麻岩については白雲母が消失し、珪線石・堇青石・カリ長石の組み合わせが存在し、さらに斜方輝石・黒雲母の組み合わせが存在する。一方、角閃石片麻岩においては、単斜輝石は豊富に存在するが斜方輝石は存在しない。したがって、当地域の変成作用の最頂点は、角閃岩相の

表5 角閃石の EPMA 分析値

Sample No.	476				
	1	2	3	4	5**
SiO ₂	40.17	41.22	43.32	41.79	47.16
TiO ₂	1.65	1.57	1.26	1.75	1.04
Al ₂ O ₃	9.78	10.22	8.65	10.17	8.97
FeO*	22.37	23.05	21.27	22.39	21.56
MnO	7.07	7.03	7.56	7.10	7.50
MgO	0.41	0.37	0.43	0.35	0.36
CaO	11.54	11.75	11.75	11.63	11.76
Na ₂ O	1.52	1.60	1.48	1.53	1.44
K ₂ O	1.30	1.38	1.05	1.39	1.20
Total	95.81	98.19	96.77	98.10	100.99
Number of cations (0 = 23)					
Si	6.399	6.407	6.735	6.467	6.952
Al	1.837	1.873	1.585	1.855	1.559
Ti	0.198	0.184	0.147	0.204	0.115
Fe	2.980	2.997	2.765	2.898	2.658
Mn	0.055	0.049	0.057	0.046	0.045
Mg	1.679	1.629	1.752	1.637	1.648
Ca	1.970	1.957	1.957	1.928	1.858
Na	0.470	0.482	0.446	0.459	0.412
K	0.264	0.274	0.208	0.274	0.226

FeO*: 全 Fe 量を FeO として計算した。

** : 結晶の周縁部の青緑色角閃石

高温部とグラニュライト相の漸移帯に属すると思われる。RAASE (1974) によると、Ti 含有量 0.20-0.25 のものはホルンブレンド・グラニュライト相に対応するとされているが、当地域のホルンブレンドの分析値の内高い Ti 値を示すものは 0.198-0.204 であり、これは上記の鉱物組み合わせからの結論を支持しているように思われる。PHILIPS (1980) は、角閃石-グラニュライト相の転移温度を 740°C-800°C、圧力を 4-6Kb に見積っている。これは上記岩石 2903C のざくろ石・黒雲母から推定された温度に類似である。

顕微鏡下の観察では、スピネルは堇青石より前に形成された組織を示し、変成作用の初期に形成されたと考えられる (藤吉, 1973)。一方当地域には、優白質花崗岩が岩脈状、プール状、脈状に入っているが、多くは片理を切って存在し、変成作用の末期に貫入・注入したことを示す。また、紅柱石、および少なくとも一部の堇青石は褶曲運動後に生成した組織を示し (藤吉, 1973)、変成作用の末期に形成されたとと思われる。したがって、紅柱石、および少なくとも一部の堇青石の形成は、この優白質花崗岩によるミグマタイト化作用の時期を示しているのかも知れない。スピネル・コランダムは、大理石または石灰質片麻岩中に存在するか、またはこれと密接に関係して存在する (藤吉, 1973)。このことは、これらの岩石が大理石または石灰質片麻岩によって優白質花崗岩の貫入・注入の影響をまぬがれたことを示し、もとは当地域に豊富に存在していたのかも知れない。

表6 堇青石・ざくろ石およびざくろ石・黒雲母の地質温度計による変成温度見積り

Sample No.	X _{Mg} garnet	X _{Mg} cordierite	X _{Mg} biotite	InK _{D1} cordierite-garnet	InK _{D2} biotite-garnet	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C
2909A	0.115	0.529	0.367	2.156	1.495	622	613	650
2903C*	0.179		0.424		1.217		703	780
2903C**	0.153		0.424		1.408		639	690

$$K_{D1}(\text{co-ga}) = \left(\frac{X_{\text{Mg}}}{1 - X_{\text{Mg}}} \right)_{\text{co}} / \left(\frac{X_{\text{Mg}}}{1 - X_{\text{Mg}}} \right)_{\text{ga}}$$

$$K_{D2}(\text{bi-ga}) = \left(\frac{X_{\text{Mg}}}{1 - X_{\text{Mg}}} \right)_{\text{bi}} / \left(\frac{X_{\text{Mg}}}{1 - X_{\text{Mg}}} \right)_{\text{ga}}$$

T₁, T₂: THOMPSON (1976); T₃: FERRY and SPEAR (1978)

* : ざくろ石の X_{Mg} の高い値の平均値を用いた。

** : ざくろ石の X_{Mg} 0.149-0.158 の範囲内の平均値を用いた (詳しくは本文)。

当地域で、泥質片麻岩の堇青石・ざくろ石、ざくろ石・黒雲母から得られた二つの異なる変成温度は、スピネル、コランダム、斜方輝石、Mg 値の高いざくろ石 ($X_{Mg} = 0.15 - 0.16$) 等の形成で表わされる高温の変成作用 (700–780°C) と優白質花崗岩の貫入・注入に伴う紅柱石、堇青石、Mg 値のより少ないざくろ石 (2903C で $X_{Mg} = 0.13$, 2909A で $X_{Mg} = 0.092$) の形成で表わされる変成作用 (610–650°C) に対応させられるのかも知れない。この問題はさらに詳しく検討する必要があるが、HIROI (1983) は黒部川下流の宇奈月地域からの優白質花崗岩のミグマタイト化作用の認められない角閃岩相の Staurolite-Kyanite 帯で、ざくろ石・黒雲母の地質温度計を用いて THOMPSON の方法で 600–650°C の変成温度を推定している。このデータは、当地域の初期の変成作用が 700°C 以上の高温に達したことを支持しているだろう。当地域の堇青石・ざくろ石からの変成岩の圧力 4.8Kb は、異なる方法で推定されているが、HIROI (1983) による宇奈月地域の変成岩の圧力 5–6Kb より低い。このことは、優白質花崗岩の貫入・注入に伴う変成作用で紅柱石、堇青石が形成されたのとはよく一致して、この優白質花崗岩の貫入に伴い少し隆起したことを意味するかも知れない。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、静岡大学理学部地球科学教室の長沢敬之助教授、黒田 直助教授、和田秀樹博士に有益なご助言をいただいた。EPMA による鉱物の化学分析に対しては、名古屋大学理学部地球科学教室の鈴木和博博士にご助力をいただいた。野外のサンプリングに対しては、富山営林署濁谷治山事業所の職員の方々にも多大の便宜をはかっていただいた。これらの方々には厚く謝意を表します。

本研究には、文部省科学研究費 (一般研究 B, 課題番号 60470053) を使用した。当局に厚くお礼申し

上げる。

文 献

- ASHWORTH, J. R. and CHINNER, G. A. (1978), Coexisting garnet and cordierite in migmatites from the Scottish Caledonides. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **65**, 379-394.
- FERRY, J. M. and SPEAR, F. S. (1978), Experimental calibration of the Partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **66**, 113-117.
- FUJIYOSHI, A. (1970), Potassium feldspars from gneisses and granites in the upper Hayatsuki-gawa area, central Japan. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **18**, 1-27.
- 藤吉 瞭(1973), 富山県立山川(早月川上流)地域の飛驒変成帯中の泥質片麻岩に含まれる特徴的鉱物およびその産状。地質雑, **79**, 761-770.
- HIROI, Y. (1983), Progressive metamorphism of the Unazuki pelitic schists in the Hida Terrane, central Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **82**, 334-350.
- ISHIOKA, K. and SUWA, K. (1956), Metasomatic development of staurolite schist from rhyolite in the Kurobe-gawa area, central Japan, a preliminary report. *Jour. Earth Sci., Nagoya Univ.*, **4**, 123-140.
- ONO, A. (1977), Temperature and pressure of the Ryoke gneisses estimated by garnet-cordierite geothermometer. *Jour. Jap. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **72**, 114-117.
- PHILLIPS, G. N. (1980), Water activity changes across an amphibolite-granulite facies transition, Broken Hill, Australia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **75**, 377-386.
- RAASE, P. (1974), Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **45**, 231-236.
- THOMPSON, A. B. (1976), Mineral reactions in pelitic rocks: . Calculation of some P-T-X (Fe-Mg) phase relations. *Am. Jour. Sci.*, **276**, 425-454.
- TURNER, F. J. (1968), *Metamorphic Petrology*. McGraw Hill, New York.