四国西部肱川地域の秩父帯北帯における 含黒雲母塩基性準片岩

Biotite-bearing basic semischists from the northern Chichibu belt in the
Hijikawa district, western Shikoku, Japan

梅 木 美 妙 (Misa UMEKI)*

榊 原 正 幸 (Masayuki SAKAKIBARA)*

Metamorphic biotites have been found from the pumpellyite-actinolite facies basic semischists in the northern Chichibu Belt, western Shikoku, Japan. Representative mineral assemblages of the northern Chichibu basic semischists in the study area are chlorite+phengite+calcite, riebeckite+phengite+chlorite+calcite, riebeckite+stilpnomerane+chlorite+calcite, biotite+riebeckite+chlorite+calcite and biotite+riebeckite+phengite+chlorite+calcite. Albite, titanite, hematite and quartz are common. The biotites occur in high-MgO basic semischists and are rich in phlogopite content. The mineral parageneses systematically change depending on $MgO/(MgO+FeO)$ of bulk compositions.

The biotite-calcite-bearing basic semischists were metasomatically altered based on petrographical and geochemical data. The isocon diagram suggests that CaO and MgO were added in significant amounts and Na_2O , K_2O and P_2O_5 were removed. It seems that the increase in MgO due to metasomatism is a cause of the formation of biotite under the pumpellyite-actinolite facies.

Keywords: Biotite, Northern Chichibu belt, Pumpellyite-actinolite facies, Basic semischists, Metasomatism

I. はじめに

黒雲母は、中から高変成度までの幅広い温度圧力条件において形成された砂泥質変成岩中の主要な造岩鉱物である。従来、それらの変成岩における黒雲母の鉱物共生関係および変成反応については多くの研究が行われてきた (Ernst, 1963; Velde, 1965; Mather, 1970; Brown, 1975; Ferry, 1984; Wang *et al.*, 1986 など)。今回、筆者らは四国西部秩父帯北帯のパンペリー石-アクチノ閃石相の三波川変成作用を受けた塩基性準片岩中から変成黒雲母を見いだした (大山・榊原, 1993; 梅木・榊原, 1995, 1998; 榊原ら, 1998)。このような低変成度の塩基性岩における黒雲母の出現は極めて希であり (例えば, Iwasaki *et al.*, 1995), 現在までその変成岩岩石学的検討はほとんど行われてい

ない。本論では、この黒雲母の産状、鉱物共生、鉱物組成および全岩化学組成に基づいて、その形成条件および岩石学的意義について検討を行う。

II. 地質概説

秩父帯北帯は、碎屑岩類、チャートおよび塩基性岩を主とする弱変成ジュラ紀付加体で、三波川変成帯もしくは御荷鉾緑色岩類の南側に隣接する (松岡, 1984; Isozaki, 1987; Yamakita, 1988; Hada and Kurimoto, 1990)。秩父帯北帯の変成作用については、Banno (1964) が三波川変成作用の最低変成度領域に相当すると報告して以来、多くの検討が行われている。一般に、秩父帯北帯は、変成鉱物組み合わせに基づいて、パンペリー石-アクチノ閃石相 (橋本・鹿島, 1970; Toriumi, 1975; 饗場, 1982; 河戸ら, 1991) およびブ

(平成9年1月6日受付, 平成10年10月9日受理)

* 愛媛大学理学部生物地球圏科学教室, 〒790-8577 松山市文京町2-5

* Department of Earth Sciences, Faculty of Sciences, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan

Fig. 1. Sample localities of biotite-bearing basic semischists in the Hijikawa district.

ドウ石-パンペリー石相(橋本・鹿島, 1970; Toriumi, 1975)程度の低温変成作用を受けているとされている。

本論の調査地域は、四国西部の大洲市東部および肱川町西部肱川流域のいわゆる秩父帯北帯である (Fig. 1)。本地域の秩父帯北帯は、岩石構成およびそれらの再結晶度に基づいて、肱川ユニットおよび鹿野川ユニットの2つに区分される (梅木・榊原, 1998; 榊原ら, 1998) (Fig. 1)。両ユニットの境界はEW 走向の北傾斜の断層で、肱川ユニットが鹿野川ユニットの構造的上位に載っている。片理面および層理面は、両ユニットを通じて、NW-SE からEW 方向の走向を示し、約20-70°の角度で北に傾斜している。問題の黒雲母を含む塩基性準片岩は、肱川ユニットから産出した。

肱川ユニットは、主としてチャートおよび砂・泥質準片岩互層によって構成され、塩基性準片岩のレンズを伴う。塩基性準片岩は、一般にチャートの構造的上位もしくは下位に伴って産するが、時に砂泥質準片岩中のレンズ状岩体として産する。岩体の規模は、幅約100-200 m、厚さ数 m-数10 m で、ユニット北部には1

km を越える大規模なものも見られる。塩基性準片岩の片理面および伸張線構造は他の岩相のそれと調和的である。調査地域を含む肱川ユニットの塩基性準片岩は、一般にパンペリー石+緑レン石+アクチノ閃石+緑泥石および緑レン石+アクチノ閃石+アルカリ輝石+緑泥石の鉱物組み合わせを含むことから、パンペリー石-アクチノ閃石相に相当する変成作用を受けていると考えられる (榊原ら, 1998)。

鹿野川ユニットは、コヒーレントな砂岩泥岩互層、チャート、塩基性岩および泥質メランジュによって構成される。泥質メランジュは、変形した泥質基質中に砂岩、チャート、石灰岩および塩基性岩ブロックを含む。塩基性岩は片状組織を示さず、原岩の構造および組織を良く保存している。これらの塩基性岩はブドウ石+パンペリー石+緑泥石の鉱物組み合わせを含むことから、いわゆるブドウ石-パンペリー石相に相当する変成作用を受けていると考えられる (梅木・榊原, 1998; 榊原ら, 1998)。

III. 肱川ユニットの塩基性準片岩の産状と原岩

肱川ユニットの塩基性準片岩は、数 cm-数 10 cm の変形した火山岩角礫を含む (Fig. 2a, b)。火山岩角礫部は、暗緑色、濃青色、褐色もしくは赤紫色を呈し、一軸伸張の変形によって特徴づけられる。火山岩角礫部の原岩はかんらん石玄武岩で、初生的な組織をよく保存している。また、これらには方解石および緑泥石によって充填された杏仁孔が発達している (Fig. 2a)。一方、基質部は緑色から暗灰色を呈し、火山角礫と同質の細粒な岩片によって構成される。基質部は火山岩角礫部に比べて方解石に非常に富んでいる。方解石が火山岩角礫部の周りを取り囲むように濃集している産状も見られる (Fig. 2a)。

これらの塩基性準片岩の原岩は、以下の点から玄武岩質ハイアロクラスティックプレッチャーであると考えられる。

- 1) 級化層理がなく極めて淘汰が悪い。
- 2) 火山岩角礫部および基質中の岩片は、すべて同質の玄武岩で異質岩片を含まない。また、基質部中の方解石は流体包有物を多量に含む。このことは、これらは石灰岩の岩片ではなく二次鉱物であることを示している。
- 3) ほとんどの玄武岩質岩片はガラス質もしくは隠微晶質である。

IV. 岩石記載

1. 塩基性準片岩の鉱物共生

今回、肱川ユニットにおける 44 の塩基性準片岩のレンズ状岩体、93 試料について 147 枚の岩石薄片を作成し、岩石記載を行った。黒雲母を含む塩基性準片岩の玄武岩質岩片の多くは、方解石によって置換されている。この場合でも、玄武岩質岩片は初生的な組織を保存している。検鏡した塩基性準片岩の中には、初生鉱物として単斜輝石およびケルスート閃石を少量含むものもある。残留単斜輝石は無色-淡赤褐色を呈し、ハイアロクラスティックプレッチャーの火山岩角礫部および基質部の両方に産する。ケルスート閃石は、火山岩岩片中のアルカリ角閃石のコアに産する。検鏡した塩基性準片岩に産する主要な変成鉱物は、黒雲母、アルカリ角閃石、フェンジャイト、スティルブノメレン、緑泥石、方解石、赤鉄鉱、アルバイト、石英およびスフェーンである (Table 1)。まれに緑閃石、パンペリー石、アクチノ閃石およびエジリンオージャイトが見いだされる (Table 1)。本地域の塩基性準片岩は、

Fig. 2. Photographs of polished samples of biotite-bearing basic semischists in the Hijikawa unit. Scale bar is 4 cm.

a. basic semischist including a basaltic breccia fringed with calcite. b. stretched basaltic fragments in basic semischist.

(1) 黒雲母を含むもの、および (2) 黒雲母を含まないものに分けられる (Table 1)。

(1) 黒雲母を含む塩基性準片岩

黒雲母を含む塩基性準片岩は、肱川ユニット中に分布する 7 つの塩基性準片岩の岩体 (25 試料、薄片 57 枚) から見いだされた (Fig. 1)。このタイプの塩基性準片岩は、黒雲母、アルカリ角閃石、フェンジャイト、スティルブノメレン、緑泥石および方解石の出現によって特徴づけられ、赤鉄鉱、石英、アルバイトおよびスフェーンを普遍的に含む (Table 1)。黒雲母は、ハイアロクラスティックプレッチャーの火山岩角礫部に比べて基質部に多産する。基質部では、主として緑泥石およびフェンジャイトが片理を形成しているが、時にアルカリ角閃石および黒雲母も片理を形成することがある。一般的に基質部は、方解石に富んでいる。一方、火山岩角礫部は、普遍的にアルカリ角閃石を含む。また、7 岩体中 4 岩体の塩基性準片岩は、スティルブノメレンを含む。4 岩体のうち 3 岩体のスティルブノメレンは、方解石脈中に産し基質中には見いだされない。1 岩体 (HG-8) では基質中に産するが、黒雲母および

Table 1. Representative mineral coexistence in the Hijikawa basic semischists

		metamorphic minerals														type of biotite
sample no.	protolith of basic semischist	Bt	Namp	Pmp	Ep	Chl	Phe	Stp	Napx	Act	Cal	Hem	Ab	Qtz	Ttn	
Bt-bearing hyaloclastite																
TS-1	breccia	+	+			+					+	+	+	+	+	b, c, d
	matrix	+	+			+	+				+	+	+	+	+	b
HG-8	breccia	+	+			+		+			+	+	+	+	+	d
	matrix	+	+			+	+	+			+	+	+	+	+	a, d
TK-10	breccia	+	+			+		+			+	+	+	+	+	b
	matrix	+	+			+	+	+			+	+	+	+	+	a, b, d
HJK-12	breccia	+	+			+					+	+	+	+	+	d
	matrix	+	+			+	+	+			+	+	+	+	+	a, d
TB-2	matrix	+	+			+					+	+	+	+	+	e
AI-4	matrix	+	+			+	+				+	+	+	+	+	a, b, d
TM-2	breccia	+	+			+	+				+	+	+	+	+	c
Bt-free																
ASA-3	hyaloclastite		+			+	+	+			+	+	+	+	+	
AT-B-3	hyaloclastite		+			+	+	+	+		+	+	+	+	+	
AT-A-5	hyaloclastite				+	+	+				+	+	+	+	+	
TB-5-A	hyaloclastite			+		+				+	+	+	+	+	+	

Abbreviations: Bt, biotite; Namp, sodic amphibole; Pmp, pumpellyite; Ep, epidote; Chl, chlorite; Phe, phengite; Stp, stilpnomelane;

Napx, sodic pyroxene; Act, actinolite; Cal, calcite; Hem, hematite; Ab, albite; Qtz, quartz; Ttn, titanite.

フェンジャイトと異なるドメインを形成している。同一ドメインを形成する変成鉱物組み合わせは、黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石、アルカリ角閃石+スティルプノメレン+緑泥石+方解石およびこれらの部分組み合わせである。

(2) 黒雲母を含まない塩基性準片岩

黒雲母を含まない塩基性準片岩は、Ca-Al 珪酸塩鉱物を含まないもの(薄片 87 枚)、および Ca-Al 珪酸塩鉱物を含むものに分けられる(薄片 3 枚)。Ca-Al 珪酸塩鉱物を含まない塩基性準片岩の同一ドメインを形成する変成鉱物組み合わせは、アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石、アルカリ角閃石+スティルプノメレン+緑泥石+方解石およびこれらの部分組み合わせである。これらは、赤鉄鉱、石英、アルバイトおよびスフェーンを普遍的に含む。希に、エジリンオーザイトが残留単斜輝石の割れ目に沿って形成されている場合もある(薄片 1 枚)。

一方、Ca-Al 珪酸塩鉱物を含む塩基性準片岩は、検鏡した 147 枚の岩石薄片で 3 枚と非常に希である。これらは緑レン石(薄片 2 枚, 2 試料, 1 岩体)もしくはパンペリー石(1 枚, 1 岩体)を含む。同一ドメインを形成する変成鉱物組み合わせは、緑レン石+フェンジャイト+緑泥石+方解石、アクチノ閃石+緑泥石+

方解石、パンペリー石+緑泥石およびこれらの部分組み合わせである(Table 1)。ただし、パンペリー石は脈鉱物のみとして産し基質中には見いだされない。

2. 黒雲母の産状

黒雲母の産状は次の 5 つに分類される; a) 片理を形成するもの, b) 残留単斜輝石を置換するもの, c) 有色鉱物の仮像中に産するもの, d) 細粒集合体を形成するもの, e) 石英によって取り囲まれた細粒スポットとして産するもの。

ハイレオクラスティックプレッシャーの基質部に産する黒雲母は、タイプ(a), (b), (d) および (e) である。片理を形成するタイプ (a) の黒雲母は、TS-1, TB-2 および TM-2 を除く試料で見られる(Fig. 3a)。タイプ (a) の黒雲母は、X=淡黄褐色もしくは淡緑褐色, Y=Z=淡緑褐色, 濃黄褐色もしくは緑褐色を呈し、緑泥石、フェンジャイトおよびアルカリ角閃石とともに片理を形成している。タイプ(b) の黒雲母は一般に、X=無色もしくは淡黄緑色, Y=Z=淡緑色を呈する。これらは、残留単斜輝石をその周辺部および割れ目に沿って置換して産する(Fig. 3b)。このタイプの黒雲母は、定向配列を示さない。残留単斜輝石の割れ目には、黒雲母の他に、アルカリ角閃石、石英、アルバイトおよび方解石が成長している。タイプ(d) の黒雲母は X=

Fig. 3. Photomicrographs of the mode of occurrences of biotites.

(a) biotite forming schistosity with chlorite and phengite. (b) biotite partly replacing relic clinopyroxene. (c) aggregates of fine-grained biotite (type d). (d) aggregates of biotite surround by quartz (type e). Scale bar is 0.5 mm.

淡黄緑色、淡緑色もしくは淡緑褐色、 $Y=Z$ =緑褐色、淡緑色もしくは緑褐色を呈し、細粒集合体を形成している (Fig. 3c)。この集合体には片理に直交する方向の伸張性割れ目が発達している。この割れ目には、アルカリ角閃石、石英、アルバイトおよび方解石が成長している。タイプ(e)の黒雲母は、TB-2で見いだされる。タイプ(e)の黒雲母は、他のタイプの黒雲母に比べて非常に細粒 (直径 0.08 mm 以下) で、周囲を石英に取り囲まれてスポット状に産出する (Fig. 3d)。このタイプの黒雲母は、 X =無色もしくは淡黄緑色、 $Y=Z$ =淡緑褐色を呈し、緑泥石およびアルカリ角閃石と共生する。

火山岩角礫中に産出する黒雲母はタイプ(b)、(c)および(d)である。黒雲母は、 X =無色、淡黄緑色もしくは淡緑褐色、 $Y=Z$ =淡緑色もしくは緑褐色を呈する。タイプ(c)の黒雲母は、有色鉱物の仮像(0.05-0.7

mm)中に細粒集合体として産する。この黒雲母は、緑泥石およびアルバイトを伴い、しばしばフェンジャイト、もしくはアルカリ角閃石および石英と共生する。

V. 黒雲母を含む塩基性準片岩の鉱物化学組成

分析は、波長分散型 EPMA (JEOL JXA-733) およびエネルギー分散型 EPMA (JSM-5400) を用いて行った。黒雲母、緑泥石およびフェンジャイトの Fe はすべて Fe^{2+} と仮定して構造式を算出した。

1. 黒雲母

肱川ユニット中の黒雲母の代表的な組成を Table 2 に示す。黒雲母の化学組成を Fig. 4 の固溶体組成図にプロットした。また、比較のために花崗岩中の黒雲母 (Dodge *et al.*, 1969; Murakami, 1969; Albuquerque, 1973; Czmannske and Wones, 1973; Honma, 1974)、三波川変成帯の泥質片岩および塩基性片岩にお

Table 2. Representative chemical compositions of biotites (O=22)

sample	TK-10-1	TK-10-1	TK-10-3	TB-2-1	TB-2-1	TB-2-1	HG-8-1	HG-8-1	HG-8-1
SiO ₂	39.5	39.7	40.8	42.5	42.6	40.9	41.3	39.8	39.7
TiO ₂	1.4	0.8	1.5	0.9	0.4	1.5	2.1	2.0	2.0
Al ₂ O ₃	11.7	11.2	11.3	12.1	11.7	11.6	12.7	11.9	12.2
FeO	16.4	16.2	15.7	14.0	14.2	14.9	18.8	19.0	19.5
MnO	0.5	0.1	0.4	0.1	0.1	0.3	0.1	0.1	0.0
MgO	14.2	15.4	14.0	17.8	18.9	15.6	12.5	13.0	12.6
CaO	0.2	1.2	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
Na ₂ O	0.6	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
K ₂ O	9.3	8.4	9.5	9.3	9.1	9.3	9.5	9.1	9.8
Total	93.8	92.8	93.6	96.9	97.2	94.1	97.2	94.9	95.8

Si	6.04	6.09	6.21	6.14	6.14	6.12	6.10	6.05	6.01
Al ^{IV}	1.96	1.91	1.79	1.86	1.86	1.88	1.90	1.95	1.99
ΣZ	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.16	0.11	0.23	0.20	0.14	0.17	0.32	0.18	0.18
Ti	0.16	0.09	0.18	0.10	0.04	0.17	0.23	0.23	0.23
Fe ²⁺	2.10	2.07	1.99	1.69	1.72	1.87	2.32	2.41	2.47
Mn	0.07	0.01	0.05	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01
Mg	3.23	3.51	3.17	3.84	4.06	3.49	2.77	2.94	2.85
ΣY	5.72	5.79	5.62	5.85	5.97	5.73	5.65	5.78	5.74
Ca	0.03	0.20	0.03	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00
Na	0.17	0.01	0.07	0.05	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01
K	1.82	1.63	1.85	1.71	1.67	1.78	1.79	1.77	1.90
ΣX	2.02	1.84	1.95	1.77	1.70	1.79	1.82	1.77	1.91
Total	15.74	15.63	15.57	15.62	15.67	15.52	15.47	15.55	15.65

ける黒雲母 (鈴木, 1977; Higashino *et al.*, 1981; Sakai, 1981), 領家変成帯の泥質変成岩中の黒雲母 (Wang *et al.*, 1986; 池田, 1990), 神居古潭変成帯 (Iwasaki *et al.*, 1995) およびオタゴ変成帯 (Craw *et al.*, 1982) の塩基性岩中の黒雲母を同様にプロットした。一般に変成岩中の黒雲母は, 花崗岩中の黒雲母の組成に比べ Al^{IV} に乏しく Mg に富む (Fig. 4)。脇川ユニットの黒雲母は, 他のより高変成度の変成岩のものと比べてフロゴパイトに近い組成 (Al^{IV}=1.76–1.99 および X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe)]=0.47–0.70) を示す。これらの黒雲母の Al^{IV} は, 同一試料内でばらつくが, X_{Mg} は, 同一試料内でほぼ一定の値を示す。また, 黒雲母の X_{Mg} は試料によって異なり, スティルプノメレンを含まない塩基性準片岩 (TS-1, TB-2, TM-2) 中の黒雲母がそれを含む塩基性準片岩の黒雲母に比べて Mg に富んでいる。これらの黒雲母の X_{Mg} は他の変成岩中の黒雲母の X_{Mg} (約 0.5–0.6) と比べても, 著しく高く, 最も Mg に富む。

2. 緑泥石

緑泥石は分析したすべての塩基性準片岩中に産する。代表的な分析値を Table 3 に示す。緑泥石の X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe)] は, 塩基性準片岩の鉱物組み合わせ

Fig. 4. Al^{IV} vs. X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe²⁺)] for biotite from the Hijikawa basic semischists.

Ryoke P.R., Ryoke pelitic and psammitic rocks (data from Wang *et al.*, 1986 and Ikeda, 1990); Sanbagawa B.S.(S), Sanbagawa basic schists in Shikoku (data from Higashino *et al.*, 1981); Sanbagawa P.S.(S), Sanbagawa pelitic schists in Shikoku (data from Higashino *et al.*, 1981); Sanbagawa B.S.(K), Sanbagawa basic schists in Kanto Mountain (data from Suzuki, 1977 and Sakai, 1981); Kamuikotan B.S., Kamuikotan basic schists (data from Iwasaki *et al.*, 1995); Otago B.S., Otago basic schists (data from Craw *et al.*, 1982); data of granitoids from Dodge *et al.*, 1969; Murakami, 1969; Albuquerque, 1973; Czarnske and Wones, 1973 and Honma, 1974).

に対応して, 規則的に変化する。黒雲母を含む塩基性準片岩の緑泥石は X_{Mg}=0.58–0.77 で, 黒雲母を含まない塩基性準片岩の緑泥石 (X_{Mg}=0.53–0.58) に比べて Mg に富んでいる (Fig. 5)。また, 黒雲母を含む塩基性準片岩の中でも, スティルプノメレンを含まない TS-1, TB-2 および TM-2 の緑泥石は X_{Mg}=0.60–0.77 で, 最も Mg に富む。黒雲母およびスティルプノメレンを両方含む塩基性準片岩の緑泥石は, X_{Mg}=0.58–0.69 である。

3. フェンジャイト

フェンジャイトの化学組成を Table 4 および Fig. 6 に示す。Fig. 6 には, 比較のために三波川変成帯における塩基性片岩中のフェンジャイトの組成領域

Table 3. Representative chemical compositions of chlorites (O=28)

sample	TK-10-1	TB-2-1	TB-2-1	TB-2-1	HJK-12-1
SiO ₂	29.2	28.9	29.0	29.6	29.8
TiO ₂	0.1	0.0	0.3	0.1	0.1
Al ₂ O ₃	15.0	17.6	17.3	16.3	16.0
FeO	22.5	17.5	19.0	18.2	19.6
MnO	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1
MgO	17.9	23.4	22.6	23.2	18.9
CaO	0.4	0.1	0.1	0.0	0.6
Na ₂ O	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0
K ₂ O	0.1	0.0	0.0	0.4	0.2
Total	85.3	88.1	88.5	88.0	85.3
Si	6.23	5.82	5.85	5.99	6.25
Al ^{IV}	1.77	2.18	2.15	2.01	1.75
Σ Z	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	2.02	2.00	1.95	1.89	2.20
Ti	0.01	0.00	0.04	0.02	0.01
Fe ²⁺	4.02	2.94	3.20	3.07	3.44
Mn	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02
Mg	5.68	7.03	6.79	6.98	5.92
Ca	0.09	0.01	0.02	0.01	0.14
Na	0.00	0.12	0.02	0.00	0.02
K	0.03	0.01	0.01	0.10	0.05
Σ w _{X,Y}	11.89	12.15	12.07	12.09	11.80
Total	19.89	20.15	20.07	20.09	19.80

Fig. 5. Al^{IV} vs. Mg/(Mg+Fe) for chlorite in the Hijikawa basic semischists.

(Higashino *et al.*, 1981) も示した。フェンジャイトは、一般に白雲母-セラドナイトの固溶体で示される。三波川変成岩中のフェンジャイトの組成は、黒雲母帯、

Table 4. Representative chemical compositions of phengites (O=22)

sample	TS-1-2	TS-1-2	HG-8-1	HG-8-1	TK-10-1
SiO ₂	53.0	51.4	50.8	49.3	48.9
TiO ₂	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6
Al ₂ O ₃	17.5	16.5	16.1	15.7	15.7
FeO	6.7	7.3	8.7	10.2	8.9
MnO	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1
MgO	6.2	7.3	6.6	7.0	6.9
CaO	0.2	0.3	0.0	0.1	0.1
Na ₂ O	0.1	0.1	0.0	0.4	0.0
K ₂ O	10.6	10.3	10.1	9.8	10.5
Total	94.8	93.7	92.9	92.8	91.5
Si	7.31	7.23	7.24	7.10	7.13
Ti	0.03	0.03	0.05	0.05	0.07
Al	2.85	2.74	2.70	2.66	2.70
Fe ²⁺	0.78	0.86	1.03	1.24	1.08
Mn	0.03	0.03	0.02	0.00	0.02
Mg	1.28	1.52	1.40	1.50	1.49
Ca	0.02	0.04	0.01	0.01	0.01
Na	0.02	0.04	0.00	0.10	0.00
K	1.86	1.84	1.83	1.80	1.94
Total	14.18	14.32	14.27	14.46	14.44

Fig. 6. A (= Al₂O₃-CaO-Na₂O-K₂O) - K (= K₂O) - F (= FeO+MgO) diagram of phengite from biotite-bearing basic semischists (analytical data of Sanbagawa biotites from Higashino *et al.*, 1981). Chl, chlorite; Grt, garnet; Bt, biotite. Solid circle, phengite from biotite-bearing and stilpnomelane-free basic semischists; open circle, phengite from biotite and stilpnomelane-bearing basic semischists.

ザクロ石帯、緑泥石帯と変成温度が低くなるにつれてセラドナイト成分に富む方向へシフトする。肱川ユニットのものは、三波川変成岩の中で最もセラドナイト成分に富む緑泥石帯のフェンジャイトに比べて、Al

Table 5. Representative chemical compositions of sodic amphiboles (O=23)

sample	TS-1-1	TS-1-1	TK-10-1	TB-2-1	TB-2-1
SiO ₂	56.4	57.1	55.6	54.6	55.1
TiO ₂	0.3	1.0	0.2	1.5	0.0
Al ₂ O ₃	1.2	1.0	1.2	1.5	1.3
Fe ₂ O ₃	15.9	12.8	8.2	18.0	13.5
FeO	5.0	8.3	15.6	9.7	7.8
MnO	0.0	0.0	0.0	9.3	0.1
MgO	11.6	10.9	9.6	10.6	10.6
CaO	0.2	0.2	0.3	0.1	1.5
Na ₂ O	7.0	7.4	6.9	6.4	6.2
K ₂ O	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Total	97.6	98.6	97.6	95.2	96.2

Si	8.02	8.09	8.02	8.03	8.03
Al ^{IV}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ TET	8.02	8.09	8.02	8.03	8.03
Ti	0.04	0.10	0.02	0.17	0.00
Al ^{VI}	0.20	0.17	0.21	0.26	0.22
Fe ³⁺	1.70	1.36	1.69	1.03	1.48
Fe ²⁺	0.59	0.98	0.99	1.19	0.95
Mn	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Mg	2.46	2.29	2.07	2.32	2.30
Σ M1-M3	4.99	4.90	4.98	4.98	4.96
Ca	0.03	0.02	0.05	0.25	0.24
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	1.93	2.02	1.92	1.83	1.75
Σ M4	1.96	2.04	1.97	2.08	1.99
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	14.97	15.03	14.97	15.09	14.98

に乏しく Fe および Mg に富んでおり、よりセラドナイトに近い組成を示す (Fig. 6)。

4. アルカリ角閃石

アルカリ角閃石は、検鏡した塩基性準片岩のうち 75 枚の薄片から見いだされ、このうち 57 枚では、黒雲母と共生している。アルカリ角閃石は、 $\text{Si} + \text{Al} + \text{Ti} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+} + \text{Mg} + \text{Mn} = 13$ として再計算し、 Fe^{2+} および Fe^{3+} を見積もった (Table 5)。アルカリ角閃石は、そのほとんどがマグネシオリーベック閃石の領域にプロットされる (Fig. 7)。黒雲母を含み、かつスティルプノメレンを含まない塩基性準片岩中のアルカリ角閃石は、黒雲母とスティルプノメレンの両方を含む塩基性準片岩のアルカリ角閃石に比べて、Mg に富んでいる。黒雲母を含まずかつスティルプノメレンを含む塩基性準片岩中のアルカリ角閃石は、これらのほぼ中間にプロットされる (Fig. 7)。

Fig. 7. Classification of sodic amphiboles in the Hijikawa basic semischists.

5. スティルプノメレン

スティルプノメレンは、TS-1 および TB-2 を除く試料の基質に産する。スティルプノメレンは X=淡緑褐色もしくは淡褐色、Y=Z=緑褐色もしくは褐色を呈し、方解石脈中に多産する。代表的な組成を Table 6 に示す。構造式は $\text{Si} + \text{Al} + \text{Ti} + \text{Fe} + \text{Mg} + \text{Mn} = 7.5$ として求めた (Eggleton, 1972)。スティルプノメレンは、他の珪酸塩鉱物に比べて極めて低い X_{Mg} を示す ($X_{\text{Mg}} = 0.36-0.40$)。

VI. 全岩化学組成

塩基性準片岩の全岩化学組成分析は、蛍光 X 線分析装置 (PHILIPS PW2400) を用いて行った。主要元素重量比の測定には、融剤と試料の割合を 10:1 で作成したガラスビードを用い (吉崎ら, 1996)、微量元素重量比の測定には、加圧成型した粉末ペレットを用いた (樋口・堀, 1996; 堀・樋口, 1996)。FeO は、過マンガン酸カリウム溶液を用いて測定した。粉末試料作成時には、肉眼で見える方解石脈および方解石によって充填された杏仁孔は取り除いた。また、黒雲母を含む玄武岩質ハイアロクラスタイトのうち、TS-1 は火山岩角礫および基質部を分離し、それぞれ分析した。分析値を Table 7 に示す。ただし、Fig. 8 および 11 にプロットした脇川ユニットの黒雲母を含まない 3 試料のうち 2 試料は、村上尚義氏に未公表データを提供して頂いた。

黒雲母を含む塩基性準片岩の火山岩角礫部および基

Table 6. Representative chemical compositions of stilpnomelanes (O=24.5)

sample	TK-10-2	HG-8-1	HG-8-1	HG-8-1
SiO ₂	44.9	46.9	47.1	46.3
TiO ₂	0.1	0.1	0.4	0.1
Al ₂ O ₃	6.4	5.6	5.7	5.3
FeO	26.0	25.2	23.6	25.4
MnO	0.3	0.5	0.4	0.3
MgO	8.8	8.5	9.0	8.0
CaO	0.8	0.2	0.1	0.5
Na ₂ O	0.2	0.1	0.1	0.2
K ₂ O	0.7	1.5	1.9	1.5
Total	88.1	88.5	88.2	87.5
Si	3.82	4.01	4.03	4.03
Ti	0.06	0.01	0.02	0.00
Al	0.64	0.56	0.58	0.55
Fe ²⁺	1.85	1.80	1.69	1.85
Mn	0.02	0.03	0.03	0.02
Mg	1.11	1.09	1.15	1.04
Ca	0.07	0.02	0.01	0.04
Na	0.03	0.02	0.02	0.04
K	0.08	0.17	0.21	0.16
Total	7.68	7.71	7.74	7.73

質部は、黒雲母を含まない塩基性準片岩に比べて、Fe₂O₃に乏しく、MgOに富む(Table 7)。黒雲母を含む塩基性準片岩のMgO/(MgO+FeO)は0.55-0.81、一方、黒雲母を含まない塩基性準片岩のMgO/(MgO+FeO)は0.54である(Table 7)。黒雲母を含むもののうち、基質部[TS-1(m)およびTK-10(m)]は細粒な方解石を多量に含むため、火山岩角礫部[TS-1(b)およびTM-2(b)]に比べて著しく高いCaO値を示す。また、基質部は、黒雲母を含まない塩基性準片岩に比べて、Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃、Na₂OおよびK₂Oに乏しく、MgOおよびCaOに富む(Table 7)。また、TS-1(m)は、他のものに比べて著しく低いSiO₂およびTiO₂値を示す。

Fig. 8は、CaOと代表的な主要および微量元素との相関関係を示した図である。黒雲母を含む塩基性準片岩のうち、火山岩角礫部と基質部を分離・分析した試料(TS-1)について注目する。CaOと他の主要元素との関係を見ると、Al₂O₃、TiO₂、Na₂OおよびK₂Oは、CaOの増加とともに減少する傾向を示す。Fig. 8には示していないが、SiO₂、Fe₂O₃、FeOおよびP₂O₅も同様に減少する。中でも、Na₂O、K₂OおよびP₂O₅は減少率が大い。微量元素では、一般に変成作用などによって移動しにくいYおよびZrが同様の傾向を示

Table 7. Representative bulk compositions of the Hijikawa basic semischists

	Bt-bearing			Bt-free	
Sample	TS-1(b)	TS-1(m)*	TK-10(m)*	TM-2(b)	AT-A-5
SiO ₂	53.2	33.2	42.9	47.6	47.6
TiO ₂	3.8	1.5	2.3	3.2	3.8
Al ₂ O ₃	9.9	5.8	7.4	15.7	15.4
Fe ₂ O ₃	8.1	4.1	5.3	4.9	10.5
FeO	3.9	2.0	3.9	4.9	3.7
MnO	0.0	0.1	0.3	0.2	0.1
MgO	7.9	8.5	7.6	6.0	4.3
CaO	5.5	43.8	26.5	8.2	6.3
Na ₂ O	4.6	1.0	2.5	4.1	4.5
K ₂ O	1.5	0.5	1.0	3.2	2.0
P ₂ O ₅	1.1	0.3	0.4	1.3	0.7
Total	99.6	100.8	100.1	99.3	98.8
Y	27	11	21	44	30
Zr	269	128	179	466	243
Sr	72	360	596	244	297
Cr	40	457	508	40	43
L.O.I.	4.5	26.4	18.1	7.0	4.3
X _{Mg}	0.67	0.81	0.66	0.55	0.54

*, calcite-rich basic schist; b, basic schist originated from basaltic breccia; m, basic schist originated from matrix of hyaloclastic breccia; L.O.I., ignition loss; X_{Mg}=MgO/(MgO+FeO).

す。これに対して、MgO、MnO、CrおよびSrは、CaOの増加とともに増加する傾向を示す。

VII. 考 察

1. 黒雲母を含む塩基性準片岩の組成共生関係

低度変成岩は、再結晶作用が不完全であるため、同一薄片内においても非平衡組織がしばしば観察される。そこでまず、観察された共生関係が平衡であるかどうかを検討する。Fig. 9は、黒雲母を含む塩基性準片岩における緑泥石、黒雲母、フェンジャイトおよびアルカリ角閃石のMgO/(MgO+FeO)と全岩のMgO/(MgO+FeO)の関係を示したものである。ただし、スティルプノメレンのMgO/(MgO+FeO)は、全岩および他の鉱物に比べて著しく低いためプロットしていない。各鉱物のMgO/(MgO+FeO)は、同一試料内ではらついているが、全体としては全岩のMgO/(MgO+FeO)とほぼ正の相関を示す。これは、各鉱物のMgO/(MgO+FeO)が全岩のそれを反映していることを示している。Fig. 10は、片理を形成する黒雲母のX_{Mg}[Mg/(Mg+Fe²⁺)]と、その黒雲母と同じドメインに出現する緑泥石、フェンジャイトもしくはアルカリ角

Fig. 8. Relationships of content between CaO and other elements of the Hijikawa basic semischists. Open circle, breccia of biotite-bearing basic semischists; cross circle, matrix of biotite-bearing basic semischists; solid circle, biotite-free basic semischists.

閃石の $X_{Mg}[Mg/(Mg+Fe^{2+})]$ をプロットしたものである。鏡下でドメインとみなした領域のなかで、黒雲母と接触しているもの、もしくは黒雲母からの距離が100 ミクロン以下のものを同一ドメイン中のペアとした。この図には、同一岩体で多いものは3 試料分、1 枚の薄片 (1 試料) 内で4 つのペアをプロットしている。スティルプノメレンは、黒雲母と同一ドメインに存在しない。黒雲母の X_{Mg} と各鉱物の X_{Mg} は、岩体の中ではばらついているが、全体としてはほぼ正の相関を示

す。これは、黒雲母と各鉱物は少なくともドメインオーダーで平衡であることを示している。従って、以下の議論では、同一ドメインを形成する鉱物組み合わせのみを共生関係として取り扱う。

今回検討した肱川ユニットの塩基性準片岩は、一般に赤鉄鉱、石英およびアルバイトを含んでいる。そこで、これらを過剰とした $A'(Al_2O_3-Na_2O)-C(CaO)-FM(FeO+MgO+MnO)-K'(KAlO_2)$ の4 成分系を用いて肱川ユニットの塩基性準片岩における鉱物共

Fig. 9. Relationships of $\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO})$ between whole rock and minerals.

生関係を検討する (Fig. 11a)。前述したように黒雲母を含む塩基性準片岩中の鉱物の X_{Mg} は、全岩のそれを反映している。そのため、緑泥石の X_{Mg} を限定し、それらと共生する鉱物の組成共生関係および全岩化学組成を示した (Fig. 11b)。また、Ca-Al 珪酸塩鉱物を含む塩基性準片岩の組成共生関係は、薄片 147 枚中 3 枚と希であるため、ここでは一般的であるアルカリ角閃石を含む共生関係を示した。ただし、前述したようにスティルプノメレンは他の珪酸塩鉱物に比べて著しく X_{Mg} が低い ($X_{\text{Mg}}=0.36-0.40$) ため、この 4 成分系でこれらとの組成共生関係を示すことはできない。

$X_{\text{Mg}} > 0.68$ の塩基性準片岩 (3 分析値を除く) は黒雲母を含み、スティルプノメレンを含まない。これらの塩基性準片岩は、以下の 5 相共存、4 相共存の鉱物組み合わせおよびこれらの部分組み合わせによって特徴づけられる。

黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石

黒雲母+フェンジャイト+緑泥石+方解石

黒雲母+アルカリ角閃石+緑泥石+方解石

黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+方解石

黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石

黒雲母、アルカリ角閃石、フェンジャイトおよび緑泥石の X_{Mg} は、いずれもスティルプノメレンを含む塩基性準片岩のものに比べて高い値を示す。全岩化学組成は、黒雲母+アルカリ角閃石+緑泥石+方解石もしくは黒雲母+フェンジャイト+緑泥石+方解石の 4 面体の中にそれぞれプロットされる。

一方、 $0.58 < X_{\text{Mg}} < 0.68$ の塩基性準片岩 (2 分析値を

Fig. 10. Distribution of X_{Mg} between coexisting biotite and other minerals.

除く) は、黒雲母およびスティルプノメレンを含む。これらの塩基性準片岩の鉱物共生関係は、 $X_{\text{Mg}} > 0.68$ の塩基性準片岩の鉱物共生関係に、アルカリ角閃石+スティルプノメレン+緑泥石+方解石およびこれらの部分組み合わせが加えられる。また、全岩化学組成は、黒雲母+アルカリ角閃石+緑泥石+方解石の 4 面体の中にプロットされる。

$0.53 < X_{\text{Mg}} < 0.58$ の塩基性準片岩は、黒雲母を含まず、スティルプノメレンを含む。これらは以下の 4 相共存の鉱物組み合わせおよびこれらの部分組み合わせで表される。

アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石
アルカリ角閃石+スティルプノメレン+緑泥石+方解石

以上のように、肱川ユニットの塩基性準片岩は、黒雲母を含む含まないにかかわらず、いずれも A' 成分に乏しい鉱物組み合わせを示す。このことは、肱川ユニットの塩基性準片岩の原岩は、もともと K および Na に対して Al に乏しかったことを示している。また、黒雲母は緑泥石の X_{Mg} が高い塩基性準片岩に出現し、一方、スティルプノメレンはその低い塩基性準片岩に出現する。パンペリー石-アクチノ閃石相の X_{Mg} の低い塩基性準片岩に、スティルプノメレンが出現することは饗場 (1982) も述べている。従って、肱川ユニットの塩基性準片岩における黒雲母は、全岩化学組成を反映しており、全岩の X_{Mg} が高い ($X_{\text{Mg}} > 0.58$) ものにのみ安定であると考えられる。

Fig. 11. $A' (Al_2O_3 - Na_2O) - C (CaO) - FM (FeO + MgO + MnO) - K' (KAlO_2)$ diagram showing the paragenesis and bulk composition of the Hijikawa basic semischists. Abbreviations of mineral refer to Table 1. Asterisk, bulk composition of biotite-bearing basic semischists.

2. 肱川ユニットの塩基性準片岩の变成条件

前述のように、榊原ら(1998)によると、肱川ユニットの塩基性準片岩はパンペリー石+エピドート+アクチノ閃石+緑泥石およびエピドート+アクチノ閃石+アルカリ輝石+緑泥石の4相組み合わせによって特徴づけられる。特にエピドート+アルカリ輝石+アクチノ閃石+緑泥石の組み合わせは、Hirajima and Banno

(1989) によるパンペリー石-アクチノ閃石相中のEADC帯のそれに相当する。Nakajima *et al.* (1977)によると、その温度条件は約280–300°C程度であると推定される。また、肱川ユニットの圧力条件は、その北部に分布する御荷鉾緑色岩類とほぼ同程度であるとされていることから、最大5 kbであると推定される(榊原ら, 1998)。

次に、肱川ユニットの塩基性岩の変成流体中の X_{CO_2} について検討する。それらは普遍的にスフェーンを含むことから、流体中の X_{CO_2} は以下の化学平衡式から見積もることができる (Ernst, 1972) :

Jacobs and Kerrick (1981) の Table 5 に基づくと、反応式 (1) における X_{CO_2} は 300°C, 6 kb で $X_{\text{CO}_2} \approx 5 \times 10^{-4}$ である。したがって、肱川ユニットの変成流体中の X_{CO_2} はそれと同程度であると考えられる。

3. 塩基性準片岩における黒雲母の安定領域

パンペリー石-アクチノ閃石相の塩基性準片岩における黒雲母の産出はほとんど報告されていない。しかし、緑色片岩相の塩基性岩には一般的に黒雲母が産出する (Tilly, 1925; Robinson, 1958; Hayama, 1959; McNamara, 1960; Miyashiro, 1958; Seki *et al.*, 1969; 田中・福田, 1974; Sakai, 1981; Craw *et al.*, 1982 など)。そこで、今回報告した肱川ユニットの黒雲母を含む共生関係と、緑色片岩相の塩基性片岩中のそれを比較し、塩基性岩における黒雲母の安定領域について検討する。

緑色片岩相の塩基性片岩中の黒雲母は、一般に緑レン石と共生する (Miyashiro, 1958; Seki *et al.*, 1969; 田中・福田, 1974; Sakai, 1981; Craw *et al.*, 1982; Tagiri *et al.*, 1993)。例えば、三波川変成帯のザクロ石帯における塩基性片岩は、黒雲母+緑レン石+アクチノ閃石+緑泥石+磁鉄鉱+赤鉄鉱の共生関係を示す (田中・福田, 1974; Sakai, 1981)。一方、肱川ユニットの塩基性準片岩では、黒雲母と緑レン石は共生せず、黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石の共生関係を示す (Fig. 11b)。これは A 'CFMK' 図で表現すると、黒雲母と緑レン石との間に、フェンジャイト+緑泥石+方解石の組成共生三角形が存在するためだと考えられる (Fig. 11a)。実際に肱川ユニットでは、フェンジャイト+緑泥石+方解石の組み合わせが普遍的に見られる。黒雲母と緑レン石が共生するためには、この3相共存の三角形が切れない。その関係は以下の反応式で表される。ただし、 $R = \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$ である。

左辺から右辺へ進む反応は、脱水・脱炭酸ガス反応であり、右辺の組み合わせは、高温側で安定である。(2) の温度条件は、黒雲母+緑レン石の組み合わせが三波川変成帯のザクロ石帯で出現することから、おそらく緑泥石帯とザクロ石帯の境界付近 (約 400°C; Banno and Sakai, 1989; Tagiri and Oba, 1986; 榎並ら, 1993 など) のそれに一致すると考えられる。この組み合わせは、三波川変成帯のほかに、阿武隈変成帯のアクチノ閃石-緑色片岩相 (Miyashiro, 1957; Tagiri *et al.*, 1993), 丹沢山地のアクチノ閃石-緑色片岩帯 (Seki *et al.*, 1969), オタゴ変成帯の黒雲母帯低温部 (Craw *et al.*, 1982) などでも出現する。上記のアクチノ閃石-緑色片岩相は約 350–450°C, 黒雲母帯は約 400°C 以上と見積もられており、三波川変成帯で見積もられた温度と矛盾しない。しかしながら、今回、発見した黒雲母は、従来の黒雲母の安定領域 (緑色片岩相以上) よりもさらに低温で産出している。これらの黒雲母は、A' 成分に乏しく X_{Mg} に富む塩基性準片岩に産出していることから、このような特異な全岩化学組成を示す塩基性準片岩には低温でも黒雲母が安定に存在し得ると考えられる (Fig. 11b)。

4. 黒雲母形成に関連した交代作用

ここでは黒雲母を含む塩基性準片岩に関連する交代作用について若干の考察を行う。肱川ユニットの黒雲母を含む塩基性準片岩は、産状および岩石記載に基づく以下の特徴的な産状を示す。

1) ハイアロクラスタイトの基質部は方解石に富む。これらは流体包有物を多量に含む。このことは、方解石が石灰岩の岩片ではなく、二次鉱物であることを示している。

2) 火山岩角礫部を取り囲むようにして、方解石が濃集している産状が見られる (Fig. 2)。

3) 玄武岩の組織を示す火山岩角礫の基質部が、方解石によって置換されている。

4) 黒雲母が残留単斜輝石を置換して産する (Fig. 3b)。

これらの産状から、黒雲母を含む塩基性準片岩は、 CO_2 を含む流体による交代作用を受けた可能性があると考えられる。また、前述したように、全岩のCaOと他の元素の関係は元素によって異なる挙動を示す (Fig. 8)。そこで、ここでは、アイソコン図を作成して、交代作用による元素の挙動を検討する。アイソコン図では、特定の元素が交代作用によってその岩石から添

Fig. 12. Isocon analyses of biotite-bearing basic semischist (TS-1).

加または除去されると、他の移動していない元素は原岩に対して一定の比率で変化する。すなわち、交代作用に関連していない元素は、アイソコン図で一直線上に乗ることになる。これに対して、交代作用によって移動した元素は直線からはずれてプロットされる (Gresens, 1967; Grant, 1986)。まず、ハイアロクラスタイトの火山岩角礫部と基質部は本来同一組成であったと仮定し、TS-1の火山岩角礫部の主要元素濃度を横軸に、基質部のそれを縦軸にとり、それぞれの元素をプロットした (Fig. 12)。この際、変質作用に対して移動しにくいとされている Y, Zr および Ti に関して、角礫部に対する基質部の濃度比は 0.40–0.48 とほぼ一定の値を示すことから、この場合のアイソコンの傾きを 0.45 と設定した。Fig. 8 によると、 Fe_2O_3 および FeO は、角礫部に対する基質部の濃度比がそれぞれ 0.51 および 0.53 で、アイソコン付近にプロットされる。しかしながら、 SiO_2 、 Al_2O_3 、MgO、MnO および CaO はこの濃度比が Y, Zr および Ti のものと比較して 0.59–7.95 と大きいのに対し、 Na_2O 、 K_2O および

P_2O_5 のそれは 0.22–0.31 と明瞭に小さい。このことは、基質部に SiO_2 、 Al_2O_3 、MgO、MnO および CaO が添加され、 Na_2O 、 K_2O および P_2O_5 が除去されたことを意味している。特に、MgO および CaO の添加は著しく、上述のアイソコンから上側に大きくはずれてプロットされる。

以上のことから、今回アイソコン図を用いて検討したハイアロクラスタイトの基質部起源の塩基性準片岩は、CaO および MgO に関して著しい交代作用を受けたと考えられる。この交代作用による MgO の添加が、パンペリー石–アクチノ閃石相の条件下におけるフロゴパイト成分に富む黒雲母の形成の要因となったと考えられる。ただし、今回の検討では、交代作用の時期および広域変成作用との関連性については明らかにできなかった。今後は、この問題についてもより詳細に検討する必要がある。

VIII. ま と め

本研究により以下のことが明らかになった。

- 1) 四国西部肱川地域の秩父帯北帯は、構成岩石および岩石の再結晶度に基づいて、肱川ユニットおよび鹿野川ユニットの2つに区分される。変成温度圧力条件は、塩基性岩の鉱物組み合わせに基づく、肱川ユニットはパンペリー石–アクチノ閃石相、鹿野川ユニットはブドウ石–アクチノ閃石相に相当する。黒雲母は肱川ユニットの塩基性準片岩に産する。
- 2) 黒雲母を含む代表的な鉱物組み合わせは、黒雲母+アルカリ角閃石+フェンジャイト+緑泥石+方解石である。黒雲母はフロゴパイト成分に富む。
- 3) 肱川ユニットの塩基性準片岩は、 Na_2O および K_2O に対して、相対的に Al_2O_3 に乏しい。また、黒雲母を含む塩基性準片岩の全岩化学組成は、黒雲母を含まない塩基性準片岩の全岩化学組成に比べて、より MgO に富む特異な組成を示す。
- 4) アイソコン図を用いた検討によると、黒雲母を含むハイアロクラスタイト起源の塩基性準片岩は、交代作用の過程で、基質部に SiO_2 、 Al_2O_3 、MgO、MnO および CaO が添加され、 Na_2O 、 K_2O および P_2O_5 が除去された。特に MgO および CaO の添加が著しい。
- 5) 黒雲母を含む塩基性準片岩の産状および全岩化学組成の検討に基づく、交代作用の過程における MgO の添加が、パンペリー石–アクチノ閃石相の条件下におけるフロゴパイト成分に富む黒雲母の形成の要因となったと考えられる。

謝 辞 愛媛大学の小松正幸教授および新潟大学の志村俊昭博士には、湿式分析に関して親切な指導を受けた。また、金属鉱業事業団の村上尚義氏には未公表データを提供して頂いた。地質調査の際には、国立大洲青年の家の職員の方々および清水 徹、昭子夫妻に大変お世話になった。野外での試料採集の際には、池田倫治氏および甲本智之氏に協力を得た。また、匿名の2名の査読者からは、本論の内容についての的確な御批判、御助言をいただいた。以上の方々に深く感謝の意を表する。

引用文献

- 饗場清文 (1982), 四国中西部秩父累帯北帯, 中津・名野川地域の三波川変成作用. 地質雑報, **88**, 875-885.
- de Albuquerque, C.A.R. (1973), Geochemistry of biotites from tonalitic rocks, Northern Portugal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 1779-1802.
- Banno, S. (1964), Petrologic studies on Sanbagawa crystalline schists in the Bessi-Ino district, central Shikoku, Japan. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II*, **15**, 203-319.
- Banno, S. and Sakai, C. (1989), Geology and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. In *Evolution of Metamorphic Belts* (Daly, J. S., Cliff, R. A. and Yardley, B.W.D., Eds.), 519-532.
- Brown, E.H. (1975), A petrogenetic grid for reactions producing biotite and other Al-Fe-Mg silicates in the greenschist facies. *J. Petrol.*, **16**, 258-271.
- Craw, D., Coombs, D.S. and Kawachi, Y. (1982), Interlayered biotite-kaolin and other altered biotite, and their relevance to the biotite isograd in eastern Otago, New Zealand. *Mineral. Mag.*, **45**, 79-85.
- Czamanske, G.K. and Wones, D.R. (1973), Oxidation during magmatic differentiation, Finnmark Complex, Oslo Area, Norway: Part 2, The mafic silicates. *J. Petrol.*, **14**, 349-380.
- Dodge, F.C.W., Smith, V.C. and Mays, R.E. (1969), Biotites from granitic rocks of the central Sierra Nevada batholith, California. *J. Petrol.*, **10**, 250-271.
- Eggleton, R.A. (1972), The crystal structure of stilpnomelane. Part II. The full cell. *Mineral. Mag.*, **38**, 693-711.
- 榎並正樹, 坂野靖行, 中村千絵 (1993), 三波川変成帯の変成相系列とP-T履歴. 月刊地球, **15**, 158-163.
- Ernst, W.G. (1963), Significance of phengitic micas from low-grade schists. *Amer. Mineral.*, **48**, 1357-1373.
- Ernst, W.G. (1972), CO₂-poor composition of fluid attending Franciscan and Sanbagawa low-grade metamorphism. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **36**, 497-504.
- Ferry, J.M. (1984), A biotite isograd in south-central Maine, USA: mineral reactions, fluid transfer, and heat transfer. *J. Petrol.*, **25**, 871-893.
- Grant, J.A. (1986), The isocon diagram - A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Econ. Geol.*, **81**, 1976-1982.
- Gresens, R.L. (1967), Composition-volume relationships of metasomatism. *Chem. Geol.*, **2**, 47-65.
- Hada, S. and Kurimoto, C. (1990), Northern Chichibu Terrane. In *Pre-Cretaceous Terranes of Japan* (Ichikawa, K., Mizutani, S., Hara, I., Hada, S. and Yao, A., Eds.), Pub. IGCP Project No. 224, Osaka, 165-183.
- 橋本光男, 鹿島愛彦 (1970), 四国西部秩父帯における古生界緑色岩の変成作用. 地質雑報, **76**, 199-204.
- Hayama, Y. (1959), Some considerations on the color of biotite and its relation to metamorphism. *J. Geol. Soc. Japan*, **65**, 21-30.
- Higashino, T., Sakai, C., Otsuki, M., Itaya, T. and Banno, S. (1981), Electron microprobe analyses of rock-forming minerals from the Sanbagawa metamorphic rocks, Shikoku. Part I. Asemi River area. *Sci. Rep. Kanazawa Univ.*, **29**, 36-64.
- 樋口 靖, 堀 利栄 (1996), 蛍光X線による微量成分分析のための珪質岩石試料の調整. 愛媛大学理学部紀要, **2**, 1-14.
- Hirajima, T. and Banno, S. (1989), Records of high pressure metamorphism in the so-called "superficial nappe" in the Chichibu belt, Japan. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, **3**, 661-664.
- Honma, H. (1974), Chemical features of biotites from metamorphic and granitic rocks of the Yanai district in the Ryoke belt, Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **69**, 390-402.
- 堀利 栄, 樋口 靖 (1996), Rh管球を用いた蛍光X線による岩石の微量成分の定量. 愛媛大学理学部紀要, **2**, 27-36.
- 池田 剛 (1990), 黒雲母のTi端成分組成 - 柳井地域領家変成岩類中の黒雲母のTi置換. 岩鉱, **85**, 357-363.
- Isozaki, Y. (1987), End-permian convergent zone along the northern margin of Kurosegawa Landmass and its products in central Shikoku, southwest Japan. *J. Geosci. Osaka City Univ.*, **30**, 51-131.

- Iwasaki, I., Watanabe, T., Itaya, T., Yamazaki, M. and Takigami, Y. (1995), Palaeogene K-Ar ages from the Kamuikotan metamorphic rocks, southern area of the Kamuikotan Gorge, central Hokkaido, northern Japan. *Geol. J.*, **30**, 281-295.
- Jacobs, G.K. and Kerrick, D.M. (1981), Devolatilization equilibria in H_2O - CO_2 and H_2O - CO_2 -NaCl fluids: an experimental and thermodynamic evaluation at elevated pressures and temperatures. *Amer. Mineral.*, **66**, 1135-1153.
- 河戸克志, 磯崎行雄, 板谷徹丸 (1991), 四国中央部における三波川帯・秩父累帯間の地体構造境界. 地質雑, **90**, 959-975.
- Mather, J.D. (1970), The biotite isograd and the lower greenschist facies in the Dalradian rocks of Scotland. *J. Petrol.*, **11**, 253-275.
- 松岡 篤 (1984), 高知県西部秩父累帯南帯の斗賀野層群. 地質雑, **90**, 455-477.
- McNamara, M.J. (1960), Geology of Maungatua. *M. Sc. thesis, Univ. Otago*.
- Miyashiro, A. (1958), Regional metamorphism of the Gosaisyo-Takanuki district in the central Abukuma plateau. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec II.*, **11**, 219-272.
- Murakami, N. (1969), Two contrastive trends of evolution of biotite in granitic rocks. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **62**, 223-247.
- Nakajima, T., Banno, S. and Suzuki, T. (1977), Reactions leading to the disappearance of pumpellyite in low-grade metamorphic rocks of the Sanbagawa metamorphic belt in central Shikoku, Japan. *J. Petrol.*, **18**, 263-284.
- 大山ゆかり, 榊原正幸 (1993), 四国西部秩父帯北帯の広域変成作用. 日本地質学会第100年学術大会講演演旨, 637.
- Robinson, P. (1958), Structural and metamorphic geology of the Brighton-Taieri Mouth area, east Otago, New Zealand. *M. Sc. thesis, Univ. Otago*.
- Sakai, C. (1981), Notes on petrography and rock-forming mineralogy (11) Green biotite in Sanbagawa basic schists in the Kanto mountains, Japan. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **76**, 403-411.
- 榊原正幸, 大山ゆかり, 梅木美妙, 榊原 光, 正野英憲, 後藤真一 (1998), 四国西部における北部秩父帯の地体構造区分と広域変成作用. 地質雑, **104**, 604-622.
- Seki, Y., Oki, Y., Matsuda, T., Mikami, K. and Okumura, K. (1969), Metamorphism in the Tanzawa mountains, central Japan (I). *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **61**, 1-24.
- 鈴木盛久 (1977), 関東山地西部地域の三波川変成帯. 三波川変成帯 (秀 敬編), 広島大学出版研究会, 207-216.
- Tagiri, M. and Oba, T. (1986), Hydrothermal syntheses of graphite from bituminous coal at 0.5-5 kbar water vapor pressure and 300-600°C. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **81**, 260-271.
- Tagiri, M., Sato, H., Matsumura, E. and Nemoto, H. (1993), Late Mesozoic low-P/high-T metamorphism preceding emplacement of Cretaceous granitic rocks in the Gosaisho-Takanuki district, Abkuma metamorphic belt. *Island arc*, **2**, 152-169.
- 田中耕平, 福田正光 (1974), 関東山地の三波川変成帯北縁部の地質構造と変成分帯—とくに黒雲母の現出について—. 岩鉱, **69**, 313-323.
- Tilley, C.E. (1925), A preliminary survey of metamorphic zones in the southern Highlands of Scotland. *Q. J. Geol. Soc.*, **81**, 100-112.
- Toriumi, M. (1975), Petrological study on Sambagawa metamorphic rocks, the Kanto mountains, central Japan. *Bull. Univ., Museum, Univ., Tokyo*, **9**, 99.
- 梅木美妙, 榊原正幸 (1995), 四国西部肱川地域における秩父帯北帯の地質構造と広域変成作用. 日本地質学会第102年学術大会講演演旨, 282.
- 梅木美妙, 榊原正幸 (1998), 四国西部肱川地域の北部秩父帯の地質および塩基性岩の岩石学的検討. 地質雑, **104**, 590-603.
- Velde, B. (1965), Phengite micas: synthesis, stability and natural occurrence. *Amer. J. Sci.*, **263**, 886-913.
- Wang, G.F., Banno, S. and Takeuchi, K. (1986), Reaction to define the biotite isograd in the Ryoke metamorphic belt, Kii Peninsula, Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **93**, 9-17.
- Yamakita, S. (1988), Jurassic-Earliest Cretaceous allochthonous complexes related to gravitational slidings in the Chichibu Terrane of eastern and central Shikoku, Southwest Japan. *J. Fac. Sci., Univ. Tokyo, Sec. II*, **21**, 467-514.
- 吉崎 正, 田村洋子, 佐野 栄, 堀 利栄, 小松正幸 (1996), 蛍光 X 線分析法による珪酸塩岩石の主要元素の分析. 愛媛大学理学部紀要, **2**, 15-25.