幌加内角閃岩体産角閃石の化学組成

—神居古潭帯幌加内角閃岩体の研究 (III)—

渡 辺 順*

(1965 年 1 月 9 日 受理)

Chemical Composition of Some Amphiboles from the Horokanai Amphibolite Massif

— Studies on the Horokanai Amphibolite Massif, Kamuikotan Structural Belt, Central Hokkaido (III) —

Jun WATANABE

(Abstract)

The petrology and structural behavior of the Horokanai amphibolites have already been reported in the previous papers. This paper describes the chemical composition of the 18 specimens of the amphiboles separated from each metamorphic facies of the amphibolite massif.

These amphiboles are generally characterized by high content of MgO and low content of Al_2O_3 . It is noted that amphiboles belonging to the earlier stage of amphibolitization are represented by such magnesia-rich type, while those of the later stage are characterized by high content of Al_2O_3 and low content of MgO.

On the other hand, the coarse-grained varieties of amphibole that were produced in the latest stage of the development of each metamorphic facies show a tendency to become very rich in magnesia as compared with those of the main facies. It is suggested that this behavior of magnesia might be related to the metasomatism in the amphibolite massif.

Furthermore, the substitution relations in Si-Al^{IV} , Mg-Fe , and Mg-Al^{VI} concerning the order-disorder phenomenon as well as the problem of vacant space of amphibole are discussed

I. は し が き

すでに前二報において斑禰岩類が角閃岩化される過程を、岩質および petrofabrics の面より述べ、あわせてその過程にみられる組成鉱物の性質の変化を大まかに記述した。

幌加内地域の角閃岩類は、主に角閃石および斜長石より構成されている。これらのうちで、角閃石は母岩の変成が進むにつれて、広い範囲にわたって変化しており、したがって角閃石を一つの鍵として、角閃岩類の変成条件の解析が可能と考えられる。そこで、もつとも変成をうけていない火成的な岩相の角閃石から、もつとも変成作用の進んだ岩相の角閃石への変化系列を、化学組成の面から検討することにしたい。

II. 角閃岩化に伴なわれる角閃石の化学組成の変化

すでにのべてきた各岩相より分離した、18本の角閃石の分析結果を第1表に示す。これにもとづいて、(O, OH) を 24 として求めた原子比を第2表に示す。また第3表は以上より求められた角閃石の

* 北海道大学理学部地質学鉱物学教室

地質学雑誌 第 71 巻 第 837 号 281-296 頁, 1965 年 6 月

それぞれの構造式を示している。これらによると幌加内角閃岩体の角閃石は、HALLIMOND, A. F. (1943) のあげた代表的角閃石 196 コの分析値にくらべ、概して MgO にとみ、Al₂O₃ に乏しい特徴がある。

まず、重量比によつて片麻状斑礫岩における角閃石 (Nos. 1~4) の変化をみてみよう。正規型相の

第1表 幌加内角閃岩の角閃石の化学組成

sp. No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Total
1 614	48.33	4.16	0.61	6.72	7.74	0.37	20.70	10.20	1.04	0.11	0.35	100.33
2 528-1	44.13	10.14	2.53	0.57	4.91	0.06	22.31	12.83	1.23	0.19	1.13	100.03
3 528-2	44.26	11.07	2.23	0.53	3.91	0.06	23.87	12.09	1.13	0.11	1.01	100.27
4 607	47.34	8.15	0.37	4.08	5.62	0.17	17.84	13.35	1.25	0.15	1.36	99.68
5 42	48.14	1.97	0.88	7.43	10.19	0.13	17.01	12.11	1.13	0.15	0.80	99.94
6 528	48.59	6.67	0.68	4.29	12.12	0.18	13.07	11.56	1.82	0.47	0.51	99.96
7 533	44.10	6.91	0.99	4.45	10.24	0.06	19.51	11.84	1.12	0.09	0.42	99.73
8 98	40.72	13.38	0.63	3.19	9.14	0.03	19.30	9.36	3.09	0.21	1.26	100.31
9 34	45.38	8.53	1.45	3.22	11.12	0.16	13.49	13.34	1.75	0.41	1.01	99.86
10 760	54.20	3.66	0.43	2.57	11.41	0.04	21.23	5.81	0.34	0.08	0.68	100.45
11 551	47.15	11.53	1.59	3.21	12.42	0.06	9.58	10.08	2.73	0.23	1.86	100.44
12 546	46.16	8.59	1.25	3.60	11.92	0.20	11.62	12.87	2.25	0.62	0.57	99.65
13 68-7	44.23	5.61	0.80	4.23	10.95	0.18	17.06	14.32	1.18	0.56	0.38	99.50
14 24	41.20	13.38	1.48	5.88	10.73	0.04	13.17	11.12	1.82	0.58	0.87	100.27
15 9	45.47	10.43	1.73	4.96	10.85	0.05	12.15	11.82	1.42	0.34	0.74	99.96
16 153	43.86	9.92	0.32	0.57	6.63	0.04	24.49	8.69	0.78	0.13	4.44	99.87
17 1	45.90	6.53	0.76	3.15	7.61	0.04	21.76	9.60	1.50	0.15	2.77	99.77
18 68-3	43.83	5.54	0.79	5.19	8.92	0.11	16.34	14.99	2.75	0.32	0.48	99.26

Analyst : Jun WATANABE

第2表 角閃石の原子比 ((O,OH) を 24 とし計算)

R''' in Y は (Si,Al)=800 を完全にしたのちに Y-group に入る Al^{VI}, Fe³⁺ の量を示す。
チタンは 2Ti として R''' に入れられる。Y-residue は X·Y-group=500 を完全にした
のちの過剰量を示す。

sp. No.	(a)Si	Al	Ti*	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	H	R''' in Y*	Y-res.	(b)v. sp.**
1 614	707	72	6	74	94	4	453	160	30	2	33	65	110	-8
2 528-1	634	171	28	7	59	1	481	197	34	3	107	68	81	34
3 528-2	630	186	24	5	46	1	509	184	31	2	96	69	101	17
4 607	683	139	4	45	67	2	386	206	35	3	132	75	26	44
5 42	721	34	10	83	128	2	382	194	32	4	79	58	60	30
6 528	726	117	8	48	151	3	293	185	52	9	50	107	46	46
7 533	662	122	11	50	128	1	438	190	32	2	41	56	112	24
8 98	599	228	8	35	112	1	426	147	88	4	123	78	109	39
9 34	677	151	16	36	138	2	302	213	50	7	100	96	22	70
10 760	771	61	4	27	135	1	454	89	9	2	65	67	153	-100
11 551	689	196	17	35	150	1	208	156	76	3	178	154	-4	35
12 546	695	152	14	42	150	3	263	208	65	13	58	117	19	86
13 68-7	675	101	9	48	139	3	390	234	35	11	38	42	65	80
14 24	616	235	17	66	134	1	295	178	52	10	86	151	-64	40
15 9	675	182	20	55	135	1	271	188	41	7	73	152	39	36
16 153	606	161	3	7	76	1	508	129	22	2	408	-20	62	-47
17 1	655	110	9	34	91	0	466	146	41	4	264	17	65	-9
18 68-3	671	99	9	59	114	2	374	244	80	5	49	47	28	129

* 2Ti

** vacant space

もの (No. 1) から片麻状緑色角閃石斑礫岩相のもの (No. 4) へ変成するにつれて, $\text{SiO}_2 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{MgO}$ は減少し, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ は増加している。また, 正規型相中にみられる粗粒化相の角閃石 (Nos. 2, 3) も, No. 1 に比べて, 同様の傾向を示しているが, MgO のみは大巾に増加している。

次に, 正規斑礫岩の角閃石 (Nos. 5~14) の変化系列をみる。縞状角閃岩相のもの (Nos. 6, 7) は, その先駆的形成相である片状角閃岩相のもの (No. 5) に比べて, $\text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ の減少および $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ の増加が認められる。また, その縞状組織を構成している優白縞の部分のもの (No. 6) と優黒縞の部分のもの (No. 7) は, 前者が後者に比べて, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO}$ が少なく, $\text{SiO}_2 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ が多い。また, すでにのべたように, 細粒

第 3 表 角 閃 石 の 構 造 式

1.	$(\text{Na}_{0.30}\text{K}_{0.02}\text{Ca}_{1.60})_{1.92}(\text{Mg}_{4.53}\text{Fe}^{2+}_{0.94}\text{Mn}_{0.04})_{5.51}(\text{Fe}^{3+}_{0.74}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.74}$ $(\text{Si}_{7.07}\text{Al}_{0.72}\text{Ti}_{0.06})_{7.85}\text{O}_{23.67}(\text{OH})_{0.33}$
2.	$(\text{Na}_{0.34}\text{K}_{0.03}\text{Ca}_{1.97})_{2.34}(\text{Mg}_{4.81}\text{Fe}^{2+}_{0.59}\text{Mn}_{0.01})_{5.41}(\text{Fe}^{3+}_{0.07}\text{Al}_{0.05}\text{Ti}_{0.28})_{0.40}$ $(\text{Si}_{6.34}\text{Al}_{1.66})_{8.00}\text{O}_{22.91}(\text{OH})_{1.09}$
3.	$(\text{Na}_{0.31}\text{K}_{0.03}\text{Ca}_{1.84})_{2.17}(\text{Mg}_{5.09}\text{Fe}^{2+}_{0.46}\text{Mn}_{0.01})_{5.56}(\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{Al}_{0.16}\text{Ti}_{0.24})_{0.45}$ $(\text{Si}_{6.30}\text{Al}_{1.70})_{8.00}\text{O}_{23.04}(\text{OH})_{0.96}$
4.	$(\text{Na}_{0.35}\text{K}_{0.03}\text{Ca}_{2.06})_{2.44}(\text{Mg}_{3.86}\text{Fe}^{2+}_{0.67}\text{Mn}_{0.02})_{4.55}(\text{Fe}^{3+}_{0.45}\text{Al}_{0.22}\text{Ti}_{0.04})_{0.71}$ $(\text{Si}_{6.83}\text{Al}_{1.17})_{8.00}\text{O}_{22.68}(\text{OH})_{1.32}$
5.	$(\text{Na}_{0.32}\text{K}_{0.04}\text{Ca}_{1.94})_{2.30}(\text{Mg}_{3.82}\text{Fe}^{2+}_{1.25}\text{Mn}_{0.02})_{5.12}(\text{Fe}^{3+}_{0.83}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.83}$ $(\text{Si}_{7.21}\text{Al}_{0.34}\text{Ti}_{0.10})_{7.65}\text{O}_{23.21}(\text{OH})_{0.79}$
6.	$(\text{Na}_{0.52}\text{K}_{0.09}\text{Ca}_{1.85})_{2.46}(\text{Mg}_{2.98}\text{Fe}^{2+}_{1.51}\text{Mn}_{0.03})_{4.47}(\text{Fe}^{3+}_{0.48}\text{Al}_{0.43}\text{Ti}_{0.05})_{0.79}$ $(\text{Si}_{7.26}\text{Al}_{0.74})_{8.00}\text{O}_{23.50}(\text{OH})_{0.50}$
7.	$(\text{Na}_{0.32}\text{K}_{0.02}\text{Ca}_{1.90})_{2.24}(\text{Mg}_{4.38}\text{Fe}^{2+}_{1.28}\text{Mn}_{0.01})_{5.67}(\text{Fe}^{3+}_{0.50}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.50}$ $(\text{Si}_{6.62}\text{Al}_{1.22}\text{Ti}_{0.11})_{7.95}\text{O}_{23.59}(\text{OH})_{0.41}$
8.	$(\text{Na}_{0.89}\text{K}_{0.04}\text{Ca}_{1.47})_{2.39}(\text{Mg}_{4.26}\text{Fe}^{2+}_{1.12}\text{Mn}_{0.01})_{5.39}(\text{Fe}^{3+}_{0.35}\text{Al}_{0.27}\text{Ti}_{0.08})_{0.70}$ $(\text{Si}_{5.99}\text{Al}_{2.01})_{8.00}\text{O}_{22.77}(\text{OH})_{1.23}$
9.	$(\text{Na}_{0.50}\text{K}_{0.07}\text{Ca}_{2.13})_{2.70}(\text{Mg}_{3.06}\text{Fe}^{2+}_{1.38}\text{Mn}_{0.02})_{4.42}(\text{Fe}^{3+}_{0.36}\text{Al}_{0.28}\text{Ti}_{0.16})_{0.80}$ $(\text{Si}_{6.77}\text{Al}_{1.23})_{8.00}\text{O}_{23.00}(\text{OH})_{1.00}$
10.	$(\text{Na}_{0.09}\text{K}_{0.02}\text{Ca}_{0.89})_{1.00}(\text{Mg}_{4.54}\text{Fe}^{2+}_{1.35}\text{Mn}_{0.01})_{5.90}(\text{Fe}^{3+}_{0.27}\text{Al}_{0.32}\text{Ti}_{0.04})_{0.63}$ $(\text{Si}_{7.71}\text{Al}_{0.29})_{8.00}\text{O}_{23.35}(\text{OH})_{0.65}$
11.	$(\text{Na}_{0.76}\text{K}_{0.03}\text{Ca}_{1.56})_{2.35}(\text{Mg}_{2.08}\text{Fe}^{2+}_{1.50}\text{Mn}_{0.01})_{3.59}(\text{Fe}^{3+}_{0.35}\text{Al}_{0.85}\text{Ti}_{0.17})_{1.37}$ $(\text{Si}_{6.89}\text{Al}_{1.11})_{8.00}\text{O}_{22.22}(\text{OH})_{1.78}$
12.	$(\text{Na}_{0.65}\text{K}_{0.13}\text{Ca}_{2.08})_{2.86}(\text{Mg}_{2.63}\text{Fe}^{2+}_{1.50}\text{Mn}_{0.03})_{4.16}(\text{Fe}^{3+}_{0.42}\text{Al}_{0.47}\text{Ti}_{0.14})_{1.03}$ $(\text{Si}_{6.95}\text{Al}_{1.05})_{8.00}\text{O}_{23.42}(\text{OH})_{0.58}$
13.	$(\text{Na}_{0.35}\text{K}_{0.11}\text{Ca}_{2.34})_{2.80}(\text{Mg}_{3.90}\text{Fe}^{2+}_{1.39}\text{Mn}_{0.03})_{5.32}(\text{Fe}^{3+}_{0.48}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.48}$ $(\text{Si}_{6.75}\text{Al}_{1.01}\text{Ti}_{0.09})_{7.85}\text{O}_{23.62}(\text{OH})_{0.38}$
14.	$(\text{Na}_{0.52}\text{K}_{0.10}\text{Ca}_{1.78})_{2.40}(\text{Mg}_{2.95}\text{Fe}^{2+}_{1.34}\text{Mn}_{0.01})_{4.30}(\text{Fe}^{3+}_{0.66}\text{Al}_{0.51}\text{Ti}_{0.17})_{1.34}$ $(\text{Si}_{6.16}\text{Al}_{1.84})_{8.00}\text{O}_{23.14}(\text{OH})_{0.86}$
15.	$(\text{Na}_{0.41}\text{K}_{0.07}\text{Ca}_{1.88})_{2.36}(\text{Mg}_{2.71}\text{Fe}^{2+}_{1.35}\text{Mn}_{0.01})_{4.07}(\text{Fe}^{3+}_{0.55}\text{Al}_{0.57}\text{Ti}_{0.20})_{1.32}$ $(\text{Si}_{6.75}\text{Al}_{1.25})_{8.00}\text{O}_{23.27}(\text{OH})_{0.73}$
16.	$(\text{Na}_{0.22}\text{K}_{0.02}\text{Ca}_{1.29})_{1.53}(\text{Mg}_{5.08}\text{Fe}^{2+}_{0.76}\text{Mn}_{0.01})_{5.85}(\text{Fe}^{3+}_{0.07}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.07}$ $(\text{Si}_{6.06}\text{Al}_{1.61}\text{Ti}_{0.03})_{7.70}\text{O}_{19.92}(\text{OH})_{4.08}$
17.	$(\text{Na}_{0.41}\text{K}_{0.04}\text{Ca}_{1.46})_{1.81}(\text{Mg}_{4.66}\text{Fe}^{2+}_{0.91}\text{Mn}_{0.00})_{5.57}(\text{Fe}^{3+}_{0.34}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.34}$ $(\text{Si}_{6.55}\text{Al}_{1.10}\text{Ti}_{0.09})_{7.74}\text{O}_{21.36}(\text{OH})_{2.64}$
18.	$(\text{Na}_{0.80}\text{K}_{0.05}\text{Ca}_{2.44})_{3.29}(\text{Mg}_{3.74}\text{Fe}^{2+}_{1.14}\text{Mn}_{0.02})_{4.90}(\text{Fe}^{3+}_{0.59}\text{Al}_{0.00}\text{Ti}_{0.00})_{0.59}$ $(\text{Si}_{6.71}\text{Al}_{0.99}\text{Ti}_{0.09})_{7.79}\text{O}_{23.51}(\text{OH})_{0.49}$

第 4 表 第 3 表にかかげた角閃石の産状

Gneissose gabbro	
1. brown hornblende.	normal type 相から
2. " "	粗粒化相から
3. " "	粗粒化相から
4. greenish brown hornblende.	gneissose green hornblende gabbro から
Normal gabbro	
5. pale green hornblende.	schistose amphibolite から
6. grassy green hornblende.	banded amphibolite の優白部から
7. " " "	" " の優黒部から
8. dark green hornblende.	banded amphibolite と fine-grained pl-amphibole schist 境界部の塩基性粗粒化相から
9. grassy green hornblende.	fine-grained pl-amphibole schist から
10. pale greenish brown hornblende.	fine-grained pl-amphibole schist と tremolite-actinolite schist 境界部の塩基性粗粒化相から
11. grassy green hornblende.	fine-grained pl-amphibole schist から
12. " " "	" " "
13. " " "	fine-grained epid-pl-amphibole schist から
14. " " "	" " "
Saussurite gabbro	
15. bluish green hornblende.	
Troctolitic gabbro	
16. tremolite.	olivine relict-amesite-tremolite rock から
17. actinolite.	amesite-actinolite schist から (上記の tremolite から変 化したもの)
18. actinolite.	actinolite schist から (上記の actinolite から変化したもの)

斜長石角閃石片岩相との境界部にみられる縞状角閃岩相は塩基性粗粒化をうけており、これ (No. 8) は, Nos.6, 7 に比べて, $\text{SiO}_2 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{CaO}$ が減少し, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{Na}_2\text{O}$ が増加している。また, 細粒斜長石角閃石片岩相のもの (Nos.9~12) は, 縞状角閃岩相のものに由来するものであつて, Nos.6, 7 に比べて, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ が減少し, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{FeO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ が増加している。細粒斜長石角閃石片岩相と, 透角閃石片岩相との境界部にみられる塩基性粗粒化相の角閃石 (No. 10) は, Nos.9, 11, 12 に比べて, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ が減少し, $\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$ が増加している。また細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相のもの (Nos.13, 14) は, Nos.9, 11, 12 に比べて, $\text{SiO}_2 \cdot \text{FeO}$ が少なく, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ がわずかに多いだけで, 他成分にはほとんど変化がみられない。

透角閃石-陽起石片岩相のもの (Nos.16~18) は, その変成が進むに伴つて, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ の減少と $\text{TiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MnO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O}$ とわずかな SiO_2 の増加がみられる。

以上を通覧すると, 角閃岩化作用の進んだ岩相の角閃石ほど, 一般に $\text{SiO}_2 \cdot \text{MgO}$ が減少し, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{alkalies}$ が増加する傾向がみられる。これに対して, 粗粒化相の角閃石は, その母岩相のものに比べて, $\text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO} \cdot \text{MnO}$ が減少し, Al_2O_3 と MgO が増加 (No. 10 のみは例外で, SiO_2 が増加し Al_2O_3 は減少している) する傾向がみられる。したがつて, 幌加内角閃岩体の角閃石を野外観察にもとづいて系列的に追求してみると, より角閃岩化の進んだ岩相の角閃石ほど, 脱珧酸・脱苦土が認められるに反し, 角閃岩化作用の各時期にみられる粗粒化相の角閃石には, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ が富化されていることが特徴とされる。

第1図 角閃石の粒度 縦軸は角閃石のZ軸方向の長さ、横軸はそのX-Y面方向の長さを示す。

III. 角閃石の晶癖と化学組成との関連性

第1図は、第1表に示したそれぞれの岩相の角閃石の粒度比を示している。粒度比は、角閃石のZ軸の長さ、X-Y面の長さの比で表わし*、これを晶癖とした。これにもとづいて示したのが第2図

第2図 角閃石の粒度比（晶癖）分布曲線
矢印は角閃岩化過程の方向を示す。

である。これによると、片麻状斑縞岩のもの (Nos. 1~4) と正規斑縞岩のもの (Nos. 5~14) では、ともにそれぞれ早期形成の角閃岩相のものほど、卓状ないし短柱状をなしており、晶癖 1~10 : 1 のものが高頻度の対称曲線を示しているが、変成の進んだ岩相の角閃石ほど (No. 4 および Nos. 9, 11, 12, 13, 14), straw form をなし、ピークのくずれた非対称曲線を示している。

以上の事実に留意して、角閃石の一般構造式 $W_{2-3}(XY)_5Z_8O_{22}(OH)_2$ のZ群におけるSiを置換する Al^{IV} の量と角閃石の晶癖との関係を示したものが第3図である。これで明らかなのは、 Al^{IV} 置換量の増大に比例して、晶癖、すなわち (Z軸の長さ)/(X-Y面の長さ) がほぼ直線的に変化するという点である。しかも、それぞれの岩相ごとにその直線勾配は早期形成の岩相のものほど急勾配であり、変成の進んだ晚期岩相のものほど緩い勾配をもっていることである。このことは、Si-Al 置換が角閃石晶癖に果す役割といった面からのみみれば、早期に形成された岩相の角閃石ほど (したがって、より火成的条件に近いものほど)、偏圧下における角閃石の晶癖は Al^{IV} 置換量に影響され難

く、また変成の進んだ岩相のものほど、比較的影射され易い傾向があることを示しているようである。もちろん、角閃石の晶癖はすべて Al^{IV} 置換量によつて規定されるのではなく、すでに petrofabrics の項でのべたように、偏圧下で角閃石は {110} 劈開面で滑動転移し、次第に長柱状ないし straw form になっていることをのべたが、偏圧といった外因のみによつてこのような晶癖になるのではなく、実は上述した結晶構造中 (特にZ群における) の Al^{IV} 置換といった、内因の果す役割もかなり大きいのではないかと、いつた点をここで強調しておきたい。まず、以上のことに留意して、次に角閃石の化学組成上の置換問題にふれてみることにしたい。

IV. 変成作用における角閃石の化学組成の置換関係

a) Calciferous amphibole の化学組成の置換関係

Calciferous amphibole の一般構造式は、次式で与えられている (MACHATSCHKI, F., 1929)。

* 従つて角閃石の $C \wedge Z$ 値を考慮した上で、長軸と短軸の比をとるならば、その比はさらに大きくなる。

 第 3 図 Si-Al^{IV} 置換と晶癖との関係

(A)図は横軸に粒度比の算術平均値をとつたもの、(B)図は第2図で最大頻度を示す粒度比点をとつたもの。Si-Al^{IV} 置換と晶癖との関係は (B) 図の方に良く示されている。

ここで、W はイオン半径の大きな金属イオン、つまり、Ca, Na および K で、X は小さな金属イオン、Mg, Fe²⁺ および Mn で、Y は Ti, Al^{VI} および Fe³⁺ を、Z は Si および Al^{IV} を表わしている。

この系列の特徴的な置換は、NaAl for Si および Al for MgSi であり、従つて Al^{IV} は理論的には Si を 2.00 まで置換できる。この様式の置換関係から作られる構造式は、第4図に示すように、

である。この系列にみられる化学組成上の関係は、次に示す主な二つの置換関係によつて定まる。

第 4 図 Calciferous amphiboles の置換関係

- (1) Si-O tetrahedra に入る Al^{IV} 量 ($Si < 8.00$)
- (2) vacant space に入る alkali 量 ($Ca + Na + K < 2.00$)

この結果, edenite は二重の置換によつて, $Na_2Ca_2Mg_5Al_2Si_6O_{22}(OH)_2$ が理論的には考えられるが, これは角閃石の一般構造式と矛盾する。また, 実際に天然にみられる calciferous amphibole の組成は, 三角図の上部の四つの組成の範囲内のものである。

上にのべたように, この系列の特徴的な置換は, $NaAl$ for Si および $AlAl$ for $MgSi$ であるから, Si を置換する Al^{IV} 量および Y 群の $Al^{VI} + Fe^{3+}$ 量を考慮して図化することにした。なお, Fe^{3+} は Al^{VI} を補うので, $Al^{VI} + Fe^{3+}$ として取り扱われる。

b) Si- Al^{IV} 置換関係

上にのべた基礎的概念にもとづいて図示したのが第 5 図である。これによれば, 片麻状斑糲岩では, 正規型相のもの (No. 1) から片麻状緑色角閃石斑糲岩相のもの (No. 4) に変成されるに伴つて, その角閃石の Y 群中の Al^{VI} 量はわずかに減少し, Z 群中の Al^{IV} 量は増加する傾向がある。また, 正規型相中の粗粒化相の角閃石 (Nos. 2, 3) も母岩相のもの (No. 1) に比べれば, 全く同様の傾向が示されている。

第 5 図 Si- Al^{IV} 置換量と $Al^{VI} + Fe^{3+}$ の関係

$Al\ II$ としたものは, 四配位のアルミニウム, すなわち Al^{IV} を示し, $Al\ I$ は六配位のもの, すなわち Al^{VI} をあらわしている。

縞状角閃岩相では、優黒部の角閃石(No. 7)は優白部のもの(No. 6)に比べ、 Al^{VI} 量は少く Al^{IV} 量は多い。すでに petrofabrics の項でのべたように、両者は同一の偏圧条件下で変成分化したものと解釈されるにもかかわらず、化学組成 (Al^{IV} と Al^{VI} 量) の上において大きな差異があらわれている。さらに、縞状角閃岩相にみられる塩基性粗粒化部の角閃石(No. 8)は、その母岩相のもの (Nos. 6, 7) に比べ、 Al^{VI} 量がわずかに増加し、 Al^{IV} 量もまた増加している。

細粒斜長石角閃石片岩相にみられる塩基性粗粒化相の角閃石(No. 10)は、その母岩相のもの(Nos. 9, 11, 12) に比べ、縞状角閃岩相中の粗粒化相のものとは逆に、 Al^{IV} と Al^{VI} 量の減少が認められる。

細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 13・14) の変化では、 Al^{IV} と Al^{VI} 量の増加が認められる。

次に、 Al^{VI} と Si- Al^{IV} の関係を示したのが第6図である。これには、Z群の $Si_{8.00}$ と total $Al_{2.00}$ を結ぶ直線より上に plot されたものは、破線で示した量だけ Al^{VI} としてY群に入ること、直線より下に plot されたものは、Z群が満たされていないことを示している。

以上にのべたことから、変成の進んだ岩相の角閃石ほど、 Al^{IV} と Al^{VI} 量とが增加していることがわかる。たとえば、片麻状斑縞岩では、正規型相の角閃石(No. 1)はZ群が満たされていないが、片麻状緑色角閃石斑縞岩相のもの(No. 4)になると、 Al^{IV} 量と Al^{VI} 量とがともに増加している。正規型相中の粗粒化相の角閃石 (Nos. 2, 3)では一層その置換量が増加している。

また、縞状角閃岩相の角閃石 (Nos. 6, 7)は、片状角閃岩相のもの(No. 5)に比べ Al^{VI} 量をもっているが、優黒部のもの (No. 7)は優白部のもの (No. 6)にくらべ、 Al^{IV} 量はわずかに増加するが、 Al^{VI} 量を失っている。しかし、その塩基性粗粒化相の角閃石 (No. 8)は、Si- Al 置換量は最大で、理論値 2.00 を超過して 2.01 を示している。細粒斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 9, 11, 12) は、すべて Al^{VI} 量をもつが、その粗粒化部のもの(No. 10)は、片麻状斑縞岩正規型相のもの、および縞状角閃岩相の粗粒化相のものに比べ、 Al^{VI} 量は高く Al^{IV} 量は逆に低い。また、細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 13, 14) の変化は、さらに、 Al^{IV} 量が増加する傾向をもっている。透角閃石一陽起石片岩相のもの(Nos. 16, 17, 18) は、いずれもZ群が満たされておらず、しかも変成が進むに伴って、 Al^{IV} 量が減少する傾向が認められる。

以上のべたことから、全体的な傾向として、早期に形成された岩相の角閃石ほど、Si- Al^{IV} 置換量は小さく、変成のより一層進んだ岩相のものほどその量は大きく、しかも Al^{VI} 量も増加する傾向が

第6図 Si- Al^{IV} 置換量と Al^{VI} との関係

あるといえよう。なお、この Al^{VI} 量は後述するようにさらに X 群の Mg を置換する。

c) Si- Al^{IV} 置換の不連続性と他地域産角閃石との比較

今まで、Si- Al^{IV} 置換と角閃岩化作用との関係を見てきた。すでにのべたように、 Al^{IV} は Z 群の $\text{Si}_{8.00}$ を理論上 2.00 まで置換可能であるが、それではこの置換量 0.00~2.00 の範囲内で、はたして連続的な置換変化を示すものであるか否かについて、次に検討してみたい。この問題は、第7図で

第7図 Al^{IV} 置換の不連続性

数字は理論上可能な Al^{IV} 置換量 (200) に対する置換比を示している。頻度曲線は世界各地産のもの、棒線は幌加内産のもの。

知ることができる。この図で示された頻度曲線は、世界各地のあらゆる岩石中の角閃石 196 コの分析値 (HALLIMOND, A. F., 1943) を改編して図表化したものである。棒グラフで示したものは、幌加内産のもの 18 コである。分析個数が少ないので厳密なことはいえないが、第7図によれば幌加内産のものは、 Al^{IV} 量 0.3~0.4, 0.7~0.8, 1.0~1.2, 1.6~1.7, 1.8 および 2.0 の範囲に多く集まり、それぞれは、理論上の置換量 2.00 の 2/10, 3/10~4/10, 5/10~6/10, 8/10, 9/10 および 10/10 に相当している。これに対し、HALLIMOND による 196 コの角閃石では、0.1~0.3, 0.4~0.5, 0.7~0.8, 1.0~1.3, 1.6~1.7, 1.8 およ

び 2.0 に集中点が認められ、それらは置換量のそれぞれ 1/10, 2/10, 3/10~4/10, 5/10~6/10, 8/10, 9/10 および 10/10 に相当している。

このように、幌加内産の角閃石でも、また世界各地のものでも、角閃石における Si- Al^{IV} の置換関係は、連続的に変化するものとみるよりは、むしろ置換の可能範囲内に分布する、一定の比率をもった特定の点をへて、段階的に変化している、と考えるべきではなかろうか。その比率とは、世界各地産のものの傾向から、1/10, 2/10, 3/10~4/10, 5/10~6/10, (7/10~7.5/10), 8/10, 9/10 および 10/10 であるといえよう。

幌加内産の角閃石は、この値にかなり酷似しているが、今後さらに分析数を増すならば、この集中値についてはかなりはつきりしたものがでる可能性がある。なお、幌加内産のものでは、7/10~7.5/10 のものが今後期待されよう。なおまた、HALLIMOND による 1/10 のものは、limestone contact にみられる透角閃石がその大部分を占めている。

d) Mg- Al^{VI} および Mg- Fe^{2+} 置換関係

すでにのべたように、X 群の Mg は Al^{VI} あるいは Fe^{2+} によつても置換される。 Al^{VI} と X 群中の Mg の関係は、第8図に示されている。図で (—) field としたのは、Z 群での Al^{IV} の不足量をあらわしている。したがって、X 群では Mg- Al^{VI} 置換は行なわれていないことを示している。図に明らかなように、 Al^{VI} 量の増加は Mg 量の減少を伴っている。しかし、詳しく吟味すれば、Mg- Al^{VI} 置換は同一岩石種内の変成系列の中でも、それぞれの変成岩相では定方向的ともいえない (特に正規斑縞岩の中で)。図によれば、Mg- Al^{VI} 置換量の最大のもは、正規斑縞岩の中でも細粒斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 9, 11, 12) である。透角閃石—陽起石片岩相 (Nos. 16, 17, 18) および、片麻状斑縞岩正規型相のもの (No. 1) にはこの置換は示されていない。縞状角閃岩相で優白部の角閃石 (No. 6) は、この置換量が大きいが優黒部のもの (No. 7) では示されていない。

第8図 Al^{VI} と Mg との相関々係 第9図 $Mg-Fe^{2+}$ 置換

しかし、その塩基性粗粒化相のもの(No. 8)では、再び置換量が増加している。以上のことに対して、片麻状斑礫岩正規型相中の粗粒化相のもの(Nos. 2, 3)は Al^{IV} 置換量も増加し、あわせて Mg も増加している。また、細粒斜長石角閃石片岩相中の粗粒化相のもの(No. 10)では、以上のものとは逆に、 Al^{VI} が Mg によつて置換されている。両岩相の粗粒化相の角閃石は、いずれにしても、 Mg の多量の増加が認められる。このことは、 $Mg-Al^{VI}$ 置換量を上回る系外からの MgO の大量の富化があつたことを示しているものであろう。しかしながら、粗粒化といつても、片麻状斑礫岩正規型相のものは、 $Mg \cdot Al^{VI}$ ともに増加しているのに対して、細粒斜長石角閃石片岩相のものは Al^{VI} を Mg が置換している。このような違いは、原岩の違い(片麻状斑礫岩と正規斑礫岩)と粗粒化時期の違い(後者は前者に比べて、より晩期形成)によるもの、と考えられる。

以上の $Mg-Al^{VI}$ 置換に関連した $Mg-Fe^{2+}$ 置換関係を第9図に示した。これによると、 Fe^{2+} 置換の大きなものは、細粒斜長石角閃石片岩相のもの(Nos. 9, 11, 12) ついで、細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相の角閃石(Nos. 13, 14)である。粗粒化相についてみると、前者中にみられるものの角閃石(No. 10)は、 Fe^{2+} のわずかな減少に対し Mg が急激に増加している。この理由は、すでに $Mg-Al^{VI}$ 置換で認められたと同じく、 Fe^{2+} による Mg の置換量を上回る系外からの MgO の富化によるものと考えられる。一方、片麻状斑礫岩正規型相中の粗粒化相の角閃石(Nos. 2, 3)では、その母岩相のもの(No. 1)に比べ、 Fe^{2+} の急激な減少と Mg の増加とが認められる。このことは、同様に系外からの MgO 富化によるものであろうと考えられる。透角閃石-陽起石片岩相のもの(Nos. 16, 17, 18)では、その変成の進むにしたがつて、 Mg を置換する Fe^{2+} 量が次第に増加している。このことは、鏡下で透角閃石より陽起石へ移行する形態が、よく観察されることでも裏付けられる。

e) $Ca-Alkalies$ 置換関係

すでに a) で述べたように、*calciferous amphibole* の二つの置換様式、すなわち $NaAl$ for Si および $AlAl$ for $MgSi$ によつて、W 群の $Ca \cdot Na$ と K との間に置換が行なわれる。これを

第 10 図 Ca-Alkali 置 換

第 10 図に示す。これによると、透角閃石—陽起石片岩相のもの (Nos. 16, 17, 18) では、変成が進むにしたがつて、Ca および alkalis 量の増加がみられ顕著な Ca-Alkali 置換は認められない。しかし、細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相のもの (Nos. 13, 14), および縞状角閃岩相のもの (Nos. 6, 7) とその粗粒化相の角閃石 (No. 8) では、Ca の減少に伴つて、alkalis の増加が認められる。細粒斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 9, 11, 12) では、Ca・alkalis とともに減少している。

f) Vacant space の問題

角閃石の構造で興味ある特徴の一つは、格子内に開放空間 (vacant space) が存在していて、2 コの Si_4O_{11} 団について 1 コの余分の alkali 原子が入り得ることである。幌加内産の角閃石の vacant space に入り得る alkali の量は、 $\text{Na} + \text{K} + \text{Ca} = 2.00$ で求めた。これを超過する量が、vacant space に入るものと考えられている (第 3 表の v. sp. としたもの)。これは、すでに HALLIMOND, A. F. (1943) がのべているところであるが、彼の所説にもとずいた、Si- Al^{IV} 置換と vacant space との関係が第 11 図に示されている。これによると、片麻状斑礫岩正規型相の角閃石 (No. 1) から片麻状緑色角閃石斑礫岩相のもの (No. 4) に変成するにしたがつて、その角閃石系列は、 Al^{IV} 置換量と vacant space に入る alkali 量とが、増加する傾向をもっている。この傾向は、正規型相中の粗粒化相では一層顕著に示される。縞状角閃岩相では、優黒部の角閃石 (No. 7) は優白部のもの (No. 6) に比べ、 Al^{IV} による置換量が著しく大きく、また vacant space に入る alkali 量はわずかに減少している。しかし、その粗粒化相のもの (No. 8) ではその母岩相にみられた傾向とは異なり、 Al^{IV} 量の増大に対し alkali 量は、かえつてわずかながら増加している。細粒斜長石片岩相中にみられる粗粒化相の角閃石 (No. 10) は、その母体岩相のもの (Nos. 9, 11, 12) に比べ、 Al^{IV} 量がわずかに減り、alkali は W 群の許容値にすら達していない。細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相の角閃石 (Nos. 13, 14) の変化系列では、 Al^{IV} 置換量は増加し、しかも vacant space に入る alkali 量は、減少する傾向が示されている。透角閃石—陽起石片岩相のもの (Nos. 16, 17, 18) では、 Al^{IV} 量は

第 11 図 Si-Al^{IV} 置換と vacant space の関係

右上に表示の岩石は世界各地産のもの（第 5 図，7 図，13 図ともに共通）

上にのべたことと反して減少し，また alkali 量は増加する傾向がある。

第 12 図は HALLIMOND が 196 コの角閃石をそれぞれの母岩種別に分類・投影したものである。これによれば，変成岩類に産出する角閃石よりも火成岩類に産出するものの方が，より Si-Al^{IV} 置換量と vacant space に入る alkali 量が多いことが明らかとなる。この図の頂部付近に投影される透角閃石は，彼によれば，limestone contact に産するものであり，Al^{IV} 置換量は極めて小さい。しかし，幌加内産の透角閃石—陽起石は，極めて特徴的な性質をもっており，Al^{IV} 置換量の

第 12 図 母岩種別にみた角閃石の Si-Al^{IV} と vacant space の関係 (第11図にもとづいて)

れの母岩相のものに比べて、大巾な MgO の増加が認められることも、また特徴とされる。このことは、粗粒化期にあたって系外からの MgO の富化にもとづくものと考えられる。

以上のことを具体的に把握するために、角閃石構造での各種の元素置換、角閃石晶癖と Al^{IV} との関連性、および vacant space の問題を野外事実にもとづいてのべた。

最後に、Si-Al^{IV} 置換についていえば、この置換は連続的に行なわれているものではなく、むしろ、一定の比率をもった特定の点をへて段階的に変化しているのではないかと考えられる事実が認められたことである。ここに角閃石における order-disorder 問題が存在する可能性が包されているように考えられるが、今後の問題として残されよう。また、偏圧条件の下で、角閃石の晶癖と Si-Al^{IV} 置換との間には、偏圧といった外因は当然のことであるが、結晶構造中 (特に Z 群における) の Al^{IV} 置換といった内因が、その晶癖を決定する上で大きな役割を果しているのではないかと、といった興味ある事実がみいだされる。このこともあわせて今後の問題とされる。

この研究を行なうにあたり、終始、舟橋三男・橋本誠二両教授に御指導をうけた。ここに銘記して厚くお礼申し上げる。この研究には、文部省科学研究費をその一部にあてた。

きいことが指摘される。このことは、幌加内のものはトロクトライト質岩を原岩としている、といった starting material の違いにもとづくものと考えられる。

V. 結 論

それぞれの岩相から 18 コの角閃石をえらびだし、化学組成変化を検討した。その結果によれば、角閃岩化作用が進むにしたがつて、それぞれの岩相に産出される角閃石の化学組成系列としては、脱苦土・脱珪酸および Al₂O₃ と alkalis が増加していることが特徴とされる。この特徴がもつとも明瞭にあらわれているのは、線構造 (I) 期の最終形成岩相、すなわち、細粒斜長石角閃石片岩相および細粒緑簾石斜長石角閃石片岩相である。

以上の特徴に対して、それぞれの変成岩相にみられる粗粒化相の角閃石では、それぞ

 第 13 図 NaK-Ca-Al^{VI}+Fe³⁺ の 関 係

参 考 文 献

- BUDDINGTON, A. F. and LEONARD, B. E. (1953) : Chemical petrology and mineralogy of hornblendes in Northwest Adirondack granitic rocks. *Am. Min.*, 38, 891~902.
- CHAO, E. C. T. (1951) : Granitization and basification by diffusion. *Norsk Geol. Tids.*, 29, 84~105.
- FOSLIE, S. (1945) : Hastingsites, and amphiboles from the epidote-amphibolite facies. *Norsk Geol. Tids.*, 25, 74~98.
- FYFE, W. S., TURNER, F. J. and VERHOOGEN, J. (1958) : Metamorphic reactions and metamorphic facies. *Geol. Soc. Am., Mem.* 73.
- HALLIMOND, A. F. (1943) : On the graphical representation of the calciferous amphiboles. *Am. Min.*, 28, 65~89.
- HARADA, Z. (1959) : Chemical Analysis of Japanese Minerals. *Jour. Fac. Sci. Hokkaido Univ.*, Ser. IV, X, 1, 1~93.
- HUTTON, C. O. (1956) : The composition of an actinolite. *Acta Cryst.*, 9, 231~232.
- KENNEDY, W. Q. (1935) : The influence of chemical factors on the crystallization of hornblende in igneous rocks. *Min. Mag.*, 24, 203~207.
- MACHATSCHKI, F. (1929) : Über die Formel der monoklinen Amphibole und Pyroxene. *Zeitsch. für Krist.*, 71, 219~240.
- REYNOLDS, D. L. (1947) : The association of basic "front" with granitization. *Science Progress*, 35, 138, 205~219.
- SUNDIUS, N. (1944) : Substitution relations in the amphibole group. *Sveriges Geol. Unders.*, Ser. C, 460, 1~111.
- (1946) : The classification of the hornblendes and the solid solution relations in the amphibole group. *Sveriges Geol. Unders.*, Ser. C, 480, 1~36.

- TILLEY, C. E. (1938) : The status of hornblende in low grade metamorphic zones of green schists. *Geol. Mag.*, 75, 497~511.
- WARREN, B. E. (1929) : The structure of tremolite, $\text{H}_2\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{SiO}_3)_8$. *Zeitsch. für Krist.*, 72, Heft 1, 42~57.
- (1930) : The crystal structure and chemical composition of the monoclinic amphiboles. *Zeitsch. für Krist.*, 72, 493~517.
- WITTELS, M. (1952) : The structural investigation of some amphiboles. *Am. Min.*, 37, 28~36.
- ZUSSMAN, J. (1955) : The Crystal Structure of an actinolite. *Acta Cryst.*, 8, 301~308.
-