

## 深成岩中のアクチノ閃石 — ホルンブレンド連晶とその再平衡

山口 佳 昭\*

Note on actinolite-hornblende intergrowth  
and its subsolidus reequilibration  
in a plutonic rock

Yoshiaki YAMAGUCHI

### はじめに

マグマ作用における角閃石の結晶作用経路は、これまでのところ、輝石や長石に比べて十分に解明されていない。これは、角閃石が多成分系の複雑な固溶体鉱物であることにもよるが、他方で、その結晶作用経路が輝石や長石のようにソルバスによって支配される事実がほとんど知られていないことによって、これまでに、変成岩ではホルンブレンドがカミングトン閃石とアクチノ閃石に対してそれぞれ不混和を示す事実が知られている (SHIDO and MIYASHIRO, 1959; ROSS *et al.*, 1969; KLEIN, 1969; COOPER and LOVERING, 1970; TAGIRI, 1977; YAMAGUCHI *et al.*, 1983)。最近、筆者は山口県須佐の高山カルクールアルカリ貫入岩体の石英閃緑岩中にアクチノ閃石—ホルンブレンドの連晶を見出して、この岩石中の角閃石の結晶作用についてくわしい報告を投稿中である。ここでは、その連晶と再平衡組織の記載にもとづいて角閃石の結晶作用におけるソルバスのもつ意義を検討する。

### 角閃石の産状と化学組成

高山カルクールアルカリ貫入岩体は中新世前~中期の須佐層群中に貫入し、これに接触変成作用を与えており (SUZUKI and NISHIMURA, 1983)、その黒雲母 K-Ar 固結年代は 11Ma とされている (西村ほか, 1982)。この岩体はカンラン石ハンレイ岩、斜長岩、斜長岩質ハンレイ岩、石英ハンレイ岩、石英閃緑岩およびアプライトからなり、層状構造はまれで、岩相変化はおよそ連続的である (YAMAZAKI, 1967; YAMAGUCHI *et*

*al.*, 1974)。石英閃緑岩は一般に岩体の最上部および周縁部に分布しており、ここで述べる角閃石連晶を含む岩石標本は高山岬西岸の丸瀬の鼻で採集した。

この岩石では、早期に晶出した自形の斜長石 (中核部: An<sub>85</sub>) と自形~半自形の斜方および単斜輝石がモード組成で約 70% を占めており、その粒間を後期に晶出した石英、カリ長石、角閃石および酸化物が埋めている。両輝石と角閃石の境界では角閃石は融食されており、角閃石晶出のはじめの段階では残液と輝石との反応関係がみられる。

はじめに晶出した角閃石は淡緑色の hornblende ~ actinolitic hornblende 組成のホルンブレンドであり、しばしばカミングトン閃石と連晶している。第 1 表、第 1 図および第 2 図にその化学組成を示す。ここでは、全 Fe を Fe<sup>2+</sup> とし、O = 23 として角閃石の構造式を計算した。STOUT (1972) による Fe<sup>3+</sup> / (Fe<sup>3+</sup> + Fe<sup>2+</sup>) の再計算はここでは用いていない。この方法によると、一般に、角閃石の M4 サイト中の R<sup>2+</sup> イオン (R<sup>2+</sup> = Fe<sup>2+</sup> + Mg + Mn) の含量が人為的に操作され、カミングトン閃石成分を無視する結果になるので、この場合には適当ではない。カミングトン閃石と共存する Ca 角閃石の M4 サイトには一般に R<sup>2+</sup> イオンが含まれている。その含量はカミングトン閃石成分の固溶の程度をあらわす目安であり、生成温度によく依存して高温になるほど増加する (ROSS *et al.*, 1969)。このために、ここでは角閃石の組成変化を相対的にあらわす目的から、全 Fe を Fe<sup>2+</sup> として扱うことにする。

淡緑色ホルンブレンドは、第 1 図に示すように、M4 サイト中の R<sup>2+</sup> 含量を減らしながらアクチノ閃石に向かって組成変化している。こうして生じたアクチノ閃石に近い組成をもつ周縁部ではこの Ca 角閃石はカミングトン閃石との共存関係をやめて、次に述べるよう

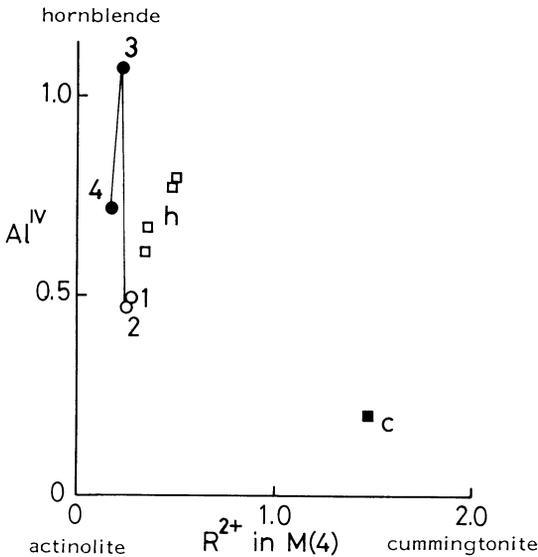
\* 島根大学理学部地質学教室

に、Fe 含量の高い緑色ホルンブレンドと連晶している。

第 1 表 角閃石の構造式

	h	1	2	3	4
Si	7.235	7.504	7.527	6.931	7.284
Al <sup>IV</sup>	0.765	0.496	0.473	1.069	0.716
Al <sup>VI</sup>	0.084	0.064	0.088	0.391	0.290
Ti	0.039	0.002	0.001	0.002	0.002
Fe	2.432	2.120	2.091	2.689	2.676
Mn	0.049	0.046	0.059	0.055	0.054
Mg	2.870	3.043	3.018	2.087	2.155
Σ Al <sup>VI</sup> to Mg	5.474	5.275	5.257	5.224	5.177
R <sup>2+</sup> in M(4)	0.474	0.275	0.257	0.224	0.177
Ca	1.671	1.867	1.864	1.959	1.945
Na	0.242	0.120	0.113	0.232	0.141
K	0.074	0.025	0.027	0.074	0.038

h：カミングトン閃石と共存するホルンブレンド  
 1-4：連晶する 2 相の Ca 角閃石（1-2：淡緑色角閃石，3-4：緑色角閃石）。1-4 の分析点は第 4 図中に示す。



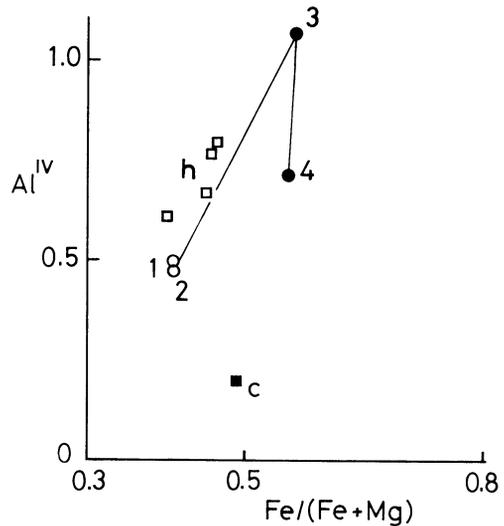
第 1 図 角閃石の R<sup>2+</sup> in M(4)-Al<sup>IV</sup> 組成

h (白正方形)：カミングトン閃石と共存するホルンブレンド，c (黒正方形)：カミングトン閃石，1-4：連晶する 2 相の Ca 角閃石（1-4 の記号は第 1 表中と同じ）。

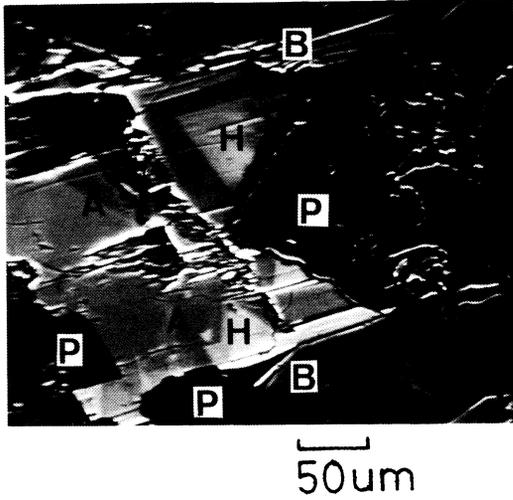
アクチノ閃石-ホルンブレンドの連晶

第 3 図および第 4 図にこの 2 相の Ca 角閃石の連晶の反射電子像を示す。像の観察には JXA-50A マイクロアナライザーを用いて、加速電圧 25 KV、試料電流 0.02 μA の条件下で行った。ここでは、淡緑色角閃石は暗い（平均原子番号が小さい）そして緑色ホルンブレンドは明るい（平均原子番号が大きい）領域として明瞭に識別され、それらの境界は化学的にシャープである。第 5 図に両角閃石の境界付近での Ca、Si および Al 含量のマイクロプローブ（ビーム径：1.5 μm）による組成プロファイルを示す。ここで、両角閃石の Ca 含量はほとんど変わらない。しかし、Si は淡緑色角閃石から緑色ホルンブレンドへ急激に減少し、また、Al はそれと逆のプロファイルを示している。第 4 図中に印した 1→4 の点で分析した角閃石の化学組成を第 1 表、第 1 図および第 2 図中に示す。これらの結果より、淡緑色ホルンブレンドは actinolite~actinolitic hornblende であり、緑色ホルンブレンドは ferro-actinolitic hornblende~ferro-hornblende である（LEAKE (1978) の分類による）。

分析点 1→4 のうち、境界に隣接した 2 点（2 と 3）の間では両角閃石の組成ギャップが 1 と 4 におけるよりも大きい。このことは第 5 図の Si と Al の組成プロファイル上でも明瞭である。これは、マグマから晶出した後の冷却過程で 2 相境界を通じる固体内拡散によ

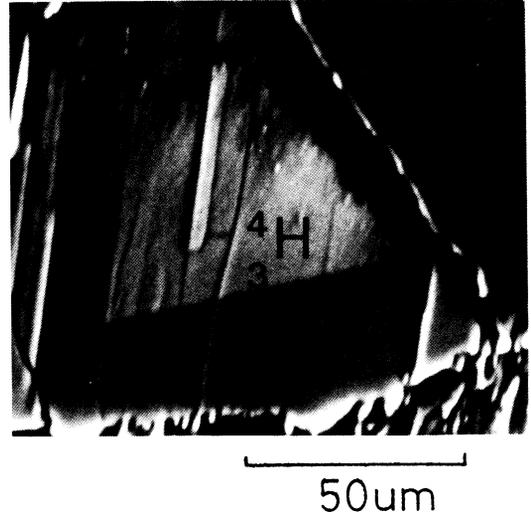


第 2 図 角閃石の Fe/(Fe+Mg)-Al<sup>IV</sup> 組成  
 記号は第 1 図中と全て同じ。



第3図 Ca角閃石連晶の反射電子像

A: 淡緑色角閃石 H: 緑色角閃石 P: 斜長石  
B: 黒雲母



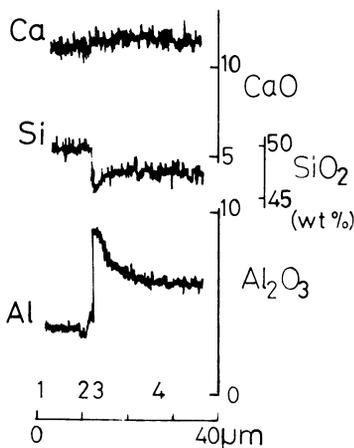
第4図 第3図の拡大像

1-4: 連晶するCa角閃石の分析点を示す。

ってサブソリダス下のソルバスに沿って組成ギャップが拡大された結果と考えられる。したがって、マグマから晶出した時の両角閃石の化学組成は、それぞれ1と4の分析値に近いものと考えられる。ここでは、 $Al^{IV}$ のギャップはあまり大きくないが、淡緑色ホルンブレンドに比べて緑色ホルンブレンドへのFeの濃集が著しい。TAGIRI (1977) は変成岩中に共存する2つのCa角閃石間においてはアクチノ閃石に比べてホルン

ブレンドの  $Fe/(Fe+Mg)$  が大きいことを総括的に示した。この性質は、マグマ作用において比較的高温のために  $Al^{IV}$  のギャップが小さい領域でも引きつけられると考えられる。

ここで分析した両角閃石の境界はほぼ  $(\bar{1}01)$  に近い平面である。変成岩において、1相の角閃石がサブソリダス下の条件で分相して結晶内再結晶 (intra-granular recrystallization) した結果、2相の角閃石が  $(\bar{1}01)$  境界面で接して共存する例が知られている (ROSS *et al.*, 1969)。その場合の連晶は、はじめに多量に離溶した  $(\bar{1}01)$  角閃石ラメラの一部が寄り集まることによって形成される。しかし、この石英閃緑岩のCa角閃石の連晶は、こうした結晶内再結晶によって形成されたとは考え難い。すなわち、1) ここには離溶ラメラは見出されない。2) 2相の境界は  $(\bar{1}01)$  に平行な面だけではない (第3図)。3) この岩石は変成作用を受けていない。だから、この角閃石連晶はマグマ作用の後期に結晶粒間の残液マグマから晶出したことは否定し難い。先に述べたように、両角閃石は固結後に局所的に再平衡されているが、それはせいぜい境界付近の  $10\sim 20\ \mu m$  の範囲に限られている。



第5図 連晶するCa角閃石の2相境界付近の化学組成プロファイル・1-4は第3図中の分析点に対応している。

### 討 論

マグマの残液から2相のCa角閃石が共存して晶出するための条件についてここで考える。OBA(1980)は合成

実験によって、 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2\text{-NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ 系における Ca 角閃石のソルバスの存在を確認した。この実験はこの純粋な二成分系におけるソルバスの頂上が  $\text{PH}_2\text{O} = 1 \text{ Kbar}$  下で  $825^\circ\text{C}$  まで拡張していることを示した。また、実験によれば、このソルバスは圧力が増加することによってもまたこの系に Fe が加わることによっても低温側へ著しく縮小する。実際に、天然の変成岩中の Ca 角閃石の二相領域の頂上について推定された温度は  $500\sim 700^\circ\text{C}$  の範囲にある (HIETANEN, 1974; MISCH and RICE, 1975; SPEAR, 1980)。一方、高山貫入岩体が貫入している須佐層群の埋没量は小さく (岡本, 1974)、この岩体の固結化はせいぜい  $1.5 \text{ Kbar}$  以下の低圧下で進行したであろう。だからソルバスの縮小は広域変成作用におけるよりもずっと小さかったと言えよう。このために、結晶粒間の残液の  $\text{PH}_2\text{O}$  が増大して固相線温度が大きく低下すれば固相線がソルバスに交叉することは可能であろう。また、粒間の残液に HF, NaF や  $\text{LiO}_2$  などの濃度が増したとすれば、当然に固相線温度の低下を助けたであろう (JAHNS and BURNHAM, 1958; WYLLIE and TUTTLE, 1961)。

次に、このような Ca 角閃石の 2 相共存をもたらせた角閃石結晶作用の特徴を考察する。この岩石では、最初に晶出したホルンブレンドはカミングトン閃石と共存しており、カミングトン閃石成分を多く固溶している (第 1 図)。その後の結晶作用の過程で、ホルンブレンドはこの成分を減少させてカミングトン閃石との共存をやめてアクチノ閃石組成に向かって組成変化する。この時はまだ Ca 角閃石のソルバスに接していないので、ソルバスを越えて連続的にアクチノ閃石に近づく (hypersolvus crystallization)。2 相の Ca 角閃石の連晶は、その後にソリダス温度がさらに降下してソルバスと交叉するに至ってから生成したと考えられる。ここで注意すべきことは、ホルンブレンド→アクチノ閃石の組成変化の過程で  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  は増加せず、むしろ減少していることである (第 2 図)。このような結晶作用経路では、降下してゆくソリダスが Ca 角閃石のソルバスに交叉するのに都合がよい。このソルバスは  $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$  が増加すると著しく低温側へ縮小するので (OBA, 1980)、もしホルンブレンドの組成変化が Fe の増加する方向へ進めば降下してゆくソリダスがソルバスに追いつくことは難しい。高い酸素分圧下で分化するマグマでは、ホルンブレンドが Fe を減少させながらアクチノ閃石へ向って組成変

化する経路がこれまでに知られている (CZAMANSKE and WONES, 1973; MASON, 1978; CZAMANSKE *et al.*, 1981)。高山貫入岩体の石英閃緑岩では角閃石と同時に磁鉄鉱が多量に晶出しており、角閃石は高い酸素分圧化で晶出したと考えられている (YAMAZAKI, 1967)。またここで、Fe に富んだ緑色ホルンブレンドが連晶するからといって残液マグマの酸素分圧が末期に減少したと考える必要はない。これは、先に述べたように、Ca 角閃石ソルバスの多成分的性質によると考えるべきである。

以上の考察から、2 相の Ca 角閃石の共存をもたらせた残液マグマの特徴として、1) 残液中に水蒸気圧が著しく増加した。2) 結晶作用が低圧下で進行した。3) 酸素分圧が高かった。と言える。これまでのところ、角閃石の結晶作用におけるソルバスの役割について注目した研究が少い。今後、マグネタイトシリーズの深成岩に共存する角閃石のくわしい研究が進められれば、このような事実が広く見出されると期待される。

この小論をまとめるに際して、これまでに火成岩中の角閃石について討論していただいた京都大学理学部地質学鉱物学教室の富田克敏、沢田順弘、三宅康幸、島根大学理学部の飯泉滋、渡辺暉夫および小林英夫の各氏にお礼申上げる。この研究には昭和 57 年度文部省科学研究費 (研究課題番号 57540477) を用いた。

## 文 献

- COOPER, A. F. and LOVERING, J. F. (1970)  
Greenschist amphiboles from Haast River, New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **27**, 11-24.
- CZAMANSKE, G. K. and WONES, D. R. (1973)  
Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka Complex, Oslo area, Norway: Part 2, The mafic silicates. *J. Petrol.*, **14**, 349-380.
- , ISHIHARA, S. and ATKIN, S. A. (1981)  
Chemistry of rock-forming minerals of the Cretaceous-Paleogene batholith in southwestern Japan and implications for magma genesis. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10431-10469.
- EWART, A., HILDRETH, W. and CARMICHAEL, I. S. E. (1975) Quaternary acid magma in New Zealand. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **51**, 1-27.
- HIETANEN, A. (1974) Amphibole pairs, epidote minerals, chlorite and plagioclase in metamorphic rocks, northern Sierra Nevada, California. *Am.*

- Mineral.*, **59**, 22-40.
- JAHNS, R. H. and BURNHAM, C. W. (1958) Experimental studies of pegmatite genesis: Part 2, Melting and recrystallization of granite and pegmatite (abstr). *Geol. Soc. Am. Bull.*, **69**, 1592-1593.
- KLEIN, C. (1968) Coexisting amphiboles. *J. Petrol.*, **9**, 281-330.
- (1969) Two-amphibole assemblages in the system actinolite-hornblende-glaucophane. *Am. Mineral.*, **54**, 212-237.
- MASON, D. R. (1978) Compositional variations in ferromagnesian minerals from porphyry copper-generating and barren intrusions of the Western Highlands, Papua, New Guinea. *Econ. Geol.*, **73**, 878-890.
- MISCH, P. and RICE, J. M. (1975) Miscibility of tremolite and hornblende in progressive Skagit metamorphic suite, North Cascade, Washington. *J. Petrol.*, **16**, 1-21.
- 西村祐二郎・三上貴彦・鈴木盛久・中村栄三 (1982) 須佐-高山地域の接触変成作用と K-Ar 年代. 日本地質学会西日本支部会報, no. 74, 14-15.
- OBA, T. (1980) Phase relations in the tremolite-pargasite join. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **71**, 247-256.
- 岡本和夫 (1974) 山陰西部の第三系, 地質ニュース, no. 243, 12-21.
- ROSS, M., PAPIKE, J. J. and SHAW, K. W. (1969) Exsolution textures in amphiboles as indicators of subsolidus thermal histories. *Mineral. Soc. Am. Spec. Pap.*, **2**, 275-299.
- SHIDO, F. and MIYASHIRO, A. (1959) Hornblendes of the basic metamorphic rocks. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, sec.* **2**, **12**, 85-102.
- SPEAR, F. S. (1980)  $\text{NaSi} \rightleftharpoons \text{CaAl}$  exchange equilibrium between plagioclase and amphibole. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **72**, 33-41.
- STOUT, J. H. (1972) Phase petrology and mineral chemistry of coexisting amphiboles from Telemark, Norway. *J. Petrol.*, **13**, 99-145.
- SUZUKI, M. and NISHIMURA, Y. (1983) Contact metamorphic effect on basaltic rocks by the Koyama gabbro complex, Susa area, Southwest Japan. *J. Sci. Hiroshima Univ. ser. C*, **8**, no. **2**, 149-163.
- TAGIRI, M. (1977) Fe-Mg partition and miscibility gap between coexisting calcic amphiboles from the southern Abukuma plateau, Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **62**, 271-281.
- TOMITA, K., YAMAGUCHI, Y. and TAKITA, R. (1974) Exsolution texture in coexisting amphiboles from Tanzawa tonalite complex, Tanzawa mountainland, Central Japan. *Mem. Geol. Soc. Jap.*, no. **11**, 95-106.
- WYLLIE, P. J. and TUTTLE, O. F. (1961) Experimental investigation of silicate system containing two volatile components: Part 2. *Am. J. Sci.*, **259**, 128-143.
- YAMAGUCHI, Y., TOMITA, K. and SAWADA, Y. (1974) Crystallization trend of zoned pyroxenes in quartz gabbro from the Koyama intrusive complex at Mt. Koyama, Yamaguchi prefecture, Japan. *Mem. Geol. Soc. Jap.*, no. **11**, 69-82.
- , SHIBAKUSA, H. and TOMITA, K. (1983) Exsolution of cummingtonite, actinolite and sodic amphibole in hornblende in high-pressure metamorphism. *Nature*, **304**, no. **5923**, 257-259.
- , Y. and TOMITA, K. (1983) Hornblende-cummingtonite and hornblende-actinolite unmixing in amphibole crystallization from hydrous magma. *Extended abstracts of WRI-4 (1983)*, 544.
- YAMAZAKI, T. (1967) Petrology of the Koyama calc-alkaline intrusive complex, Yamaguchi prefecture, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ.*, ser. **3**, **10**, 99-150.