丹沢山地のテクトニクス

—変成岩類の相解析による考察—

荒 井 融*

Tectonics of Tanzawa Mountains —constraints from metamorphic petrology—

Toru ARAI*

Abstract Basaltic and andesitic rocks of the Miocene Tanzawa Group underwent low- to medium-grade metamorphism around the quartz diorite body. Mineral chemistry and phase relations of Ca-Al silicates, actinolite and tschermakitic hornblende in the greenschist facies and the prehnite-pumpellyite facies rocks have been investigated.

The assemblage of epidote, pumpellyite, and prehnite containing quartz and chlorite in the higher prehnite-pumpellyite facies rocks, and the assemblage of epidote, pumpellyite, and actinolite are often found in the same zone. By contrast, the assemblage of epidote, prehnite, and actinolite is often seen in the eastern area of Tanzawa Mountains. Tschermakitic hornblendes with pumpellyite or prehnite are firstly found in the transitional zone of the prehnite-pumpellyite facies and the greenschist facies.

The phase relations of low-grade mineral assemblages in the basaltic rocks including tschermakitic hornblende, epidote, prehnite, pumpellyite, actinolite, whose compositions were analysed by EPMA, were examined by means of SCHREINEMAKERS' bundle. The results are as follows: 1). The prehnite-epidote-actinolite assemblage is only stable in the lower pressure conditions than pumpellyite-actinolite-epidote assemblages. 2). The tschermakitic hornblende-prehnite-epidote assemblage is stable in the higher temperature conditions than prehnite-epidote-actinolite assemblages. 3). It is concluded that the metamorphic pressure of the western half region of Tanzawa Mountains is higher than that of the eastern region.

The following characteristic features are observed in amphibole composite grains: pulled-apart actinolite is filled with common hornblende, and rotated actinolite is fringed with pressure shadows of common hornblende which makes the mineral lineation trending along emplacement direction of the quartz diorite intrusive. The schistosity and mineral lineation defined by common hornblende, epidote and other elongated minerals develop near the quartz diorite intrusive. The rocks showing the plastic deformation structure also contain abundant rotational structure such as asymmetrical pressure shadows. Such evidence strongly suggests the presence of synmetamorphic deformation involving rotational components, which is due to the diapiric upwelling of the Tanzawa quartz diorite.

はじめに

丹沢層群の中-塩基性火山岩類は、丹沢山地中央部に分布する石英閃緑岩体の周囲で、沸石相から角閃岩相ま

での変成作用を受けている (SEKI *et al.*, 1969, 1971). 変成岩類は、石英閃緑岩体の南側の幅 1-4 km の東西に延びる地域で片理の発達著しく、この結晶片岩地帯の成因を含めた変成史、構造発達史について、解釈が分かれている。

変成分帯を最初に行った SUGI (1931) は、結晶片岩を

1986年6月2日受付。1986年11月22日受理。

* 地質工学株式会社。Geological Engineering Co. Ltd., 2-11-9, Yotsuya, Shinjuku, Tokyo, 160 Japan.

第1図 丹沢山地の地質構造と変成分帯の概略図。

〔A〕地質構造 (滝田, 1974; 杉山, 1976 を簡略化)。〔B〕変成分帯 (SEKI *et al.*, 1969, 1971; 坂野・関, 1979 を簡略化)。数字 1~5 は試料採取を行った地域を示す。

形成した早期の変成作用に、石英閃緑岩の貫入に伴う後期の接触変成作用が重複したと考えた。また、丹沢団体研究グループ(1975)、杉山(1976)は、石英閃緑岩の貫入に先行する広域的な続成変成作用が存在し、結晶片岩が形成されたと述べている。一方、結晶片岩の成因には石英閃緑岩が密接に関与していたという解釈もある。MIKAMI(1961)、SEKI *et al.* (1971)などは、石英閃緑岩体が南へ向かって衝上、貫入したことによって、岩体南側に結晶片岩地帯が形成されたと考えた。

丹沢山地の地質学的、岩石学的研究は、以上の研究を始めとして多数に及ぶが、変成岩の厳密な相解析と、それにもとづく熱史についてはまだ十分に明らかにされていない。筆者は丹沢山地の変成帯のうち、ブドウ石—パンペリー石相から緑色片岩相に相当する低温部で相解析を行った。また、結晶片岩の成因、形成期に言及するため、高温部に分布するカルシウム角閃石の累帯構造を観察した。小論では、これらの研究結果を報告するとともに、丹沢山地の変成作用のメカニズムについてのモデルを提案する。

なお、小論は愛媛大学理学部地球科学教室の修士論文として書かれたものを、加筆、修正したものである。修士論文の指導と原稿を読んでいただいた鳥海光弘博士(現在東京大学)に深く感謝する。愛媛大学理学部地球科学教室と京都大学理学部地質学鉱物学教室の方々には有

益な助言、討論をいただいた。横浜国立大学の島 誠教授と地質工学(株)の方々には多くの便宜と励ましをいただいた。これらの方々に重ねて感謝するものである。

地 質 概 説

丹沢層群とそれに貫入する石英閃緑岩体の構造と岩石学的特徴を、従来の諸研究にもとづいて概観する。

丹沢層群は主として中-塩基性の火山碎屑岩、溶岩、および貫入岩からなり、層厚は 7000—10000 m に及ぶとされている。地質構造と層序については MIKAMI(1961, 1962)、丹沢団体研究グループ(1973, 1975, 1976)、杉山(1976)などによって詳細に報告されている。石英閃緑岩体を中心として、外側へ向かって上位層の分布するドーム状構造を形成しており、一般に下位層ほど急傾斜を示している。特に石英閃緑岩体の南側は、幅 2—4 km にわたって広域的に逆転していることが知られている(第1図(A))。

変成作用は沸石相から角閃岩相に及んでいる。SEKI *et al.* (1969, 1971)は、石英閃緑岩体へ向かって以下の鉱物相を識別した。

- I ; ヒューランダイト重相
- II ; ローモンタイト重相
- III ; ブドウ石—パンペリー石相
- IV ; 緑色片岩相

V ; 角閃岩相

このうち緑色片岩相と角閃岩相に属する岩石は、石英閃緑岩体南側の幅 1—4 km の比較的広い地域と、北西側の一部の地域において、片理や線構造の発達した結晶片岩となっている(杉山, 1976). これに対して、石英閃緑岩体東側は片理に乏しく、ホルンフェルス様の岩相を示しており、結晶片岩との関係は漸移的である(第 1 図(B)).

石英閃緑岩体は、Mikami (1961) などによって、北から南へ衝上するような貫入形態を持つと考えられていた。一方、滝田(1974)は、18 の独立した岩体からなるろうと状の複合岩体であると述べている。滝田(1974)の識別した岩体のうち、西部から中央部に分布する畦ヶ丸岩体と、東部に分布するユウシン岩体の両岩体は、複合岩体の分布面積の大半を占めており、一部で漸移関係にあるとされている。畦ヶ丸岩体東部とユウシン岩体には斑状組織が認められること、また規模の大きいループペンダントが岩体東部に多いことなど、石英閃緑岩は全体に東へ向かって浅所の岩相を示している。地質年代としては、河野・植田(1966)によって、4.7—5.2 Ma という黒雲母の K-Ar 年代が報告されている。

岩 石 記 載

丹沢山地の変成岩類は、中-塩基性火成岩を原岩としているため、鉱物種の多様なブドウ石—パンペリー石相から緑色片岩相に相当する地域が相解析に適している。筆者は、SEKI *et al.* (1969, 1971), 坂野・関(1979)によるパンペリー石—ブドウ石—緑泥石帯と、アクチノ閃石—緑色片岩帯の境界部に相当すると考えられる 5 地域で試料を採取し、相解析を行った(第 1 図に表示)。

得られた試料は凝灰岩、火山礫凝灰岩、溶岩を原岩とした緑色岩であり、いずれも火山礫、溶岩の空孔、凝灰岩の葉理・層理面など、原岩の構造を良く保存している。大部分は塊状岩であるが、世附川、大又沢、三保ダムの 3 地域のものでは細粒の凝灰岩に弱い劈開が認められることがあり、ブドウ石、緑簾石、緑泥石などの変成鉱物の量比の違いによる縞状構造が発達することもある。

光学顕微鏡で観察した結果、単斜輝石とイルメナイトのラメラ構造を残した磁鉄鉱は、大半が反応せずに残存している。また溶岩と貫入岩は反応が進んでいないため、Ca に富む斜長石が残存している。一方、火山ガラス、斜方輝石、カンラン石は変成鉱物によって置き換えられており、碎屑岩類では少量の残留鉱物を除いて大部分が再結晶している。また脈鉱物として石英、沸石族、

緑簾石、緑泥石、および方解石が認められる。

鉱 物 記 載

残留鉱物と脈鉱物を除くと、相解析の対象となるのは、石英、斜長石、白雲母、緑泥石、緑簾石、ブドウ石、パンペリー石、カルシウム角閃石、スフェーン、方解石、および硫化鉄鉱物である。このうち変成作用の指標として重要な Ca-Al 含水珪酸塩鉱物とカルシウム角閃石について、産状と化学組織の特徴を述べる。分析には主として日本電子 JXA-733 型マイクロアナライザーを使用し、BENCE-ALBEE 法にもとづいて補正計算を行った。分析値のうち代表的なものを第 1 表に、二次電子像を図版の写真に示す。

(1) 緑簾石 緑簾石は斜長石を置き換えて不規則な形態をなすもの(図版 I-a)と、緑泥石中で自形結晶で産するもの(図版 I-b)とがある。いずれも 20—100 μm 程度の粒径を持っているが、後者はやや細粒である。一般に著しく不均質であり、単一の結晶内部において $\text{Fe}^{3+}/(\text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ 比が最高 0.15 程度変化することがある。斜長石中のものは累帯構造も不規則な形態を持っているが、緑泥石中のものは縁へ向かって Al の増加する規則的な累帯構造を持っており、両者の化学組成の違いはほとんどない。緑簾石の固溶体は、変成温度の上昇に伴って Al 端成分側へ組成領域が拡大することが NAKAJIMA *et al.* (1977) などによって詳しく報告されており、累帯構造は大部分が温度上昇期に形成されたと判断される。

(2) ブドウ石 ブドウ石は斜長石と緑泥石中で集合体をつくることが多い。明瞭な自形を示す結晶を観察すると、例外なく縁へ向かって Fe^{3+} が減少し、Al が増加する累帯構造を持っており、途中 $\text{Fe}^{3+}/(\text{Al} + \text{Fe}^{3+})$ 比で 0.05 から 0.15 程度の組成的な不連続が認められる(図版 I-c)。縁へ向かって Al の増加する傾向は、共存する緑簾石の累帯構造と調和的であり、温度上昇期の累帯構造と考えられる。組成の不連続の原因は不明であるが、温度上昇期に Fe^{3+} の活動度の高い鉱物(例えば赤鉄鉱など)との共存関係が失われたことなどが推察される。

(3) パンペリー石 パンペリー石は緑泥石などとともにアミグダル中で細粒な自形結晶の集合体をつくるもの(図版 I-d)と、斜長石中で 20—50 μm 程度の半自形を示すもの(図版 I-e)がある。いずれも不均質であり、縁へ向かって Al または Mg が増大し、 Fe^* (全鉄)が減少する規則的な累帯構造を持っている。パンペリー石の Fe^* 含有量が、変成温度の上昇に伴って減少することは、饗場(1982)などによって論じられており、共存する緑簾石の累帯構造と調和的であるため、パンペリー石の

第1表 主要変成鉱物の分析値.

sample (wt %)	epidote				pumpellyite			prehnite		
	M0	M4	A3	A10	M0	A3	A10	M0	M4	A3
SiO ₂	37.37	38.83	37.75	38.63	37.31	36.67	36.64	43.43	43.20	43.83
TiO ₂	0.00	0.04	0.00	0.07	0.03	0.05	0.01	0.08	0.11	0.05
Al ₂ O ₃	23.07	25.85	23.82	26.91	18.31	20.80	22.44	21.92	20.67	19.93
Fe ₂ O ₃	12.40	8.89	11.90	8.57	12.71	10.45	9.70	3.04	4.53	6.12
MgO	0.04	0.02	0.02	0.04	2.32	2.44	1.19	0.03	0.00	0.01
MnO	0.13	0.07	0.09	0.15	0.04	0.08	0.04	0.01	0.02	0.01
CaO	22.79	22.78	22.85	23.26	21.46	21.38	22.36	26.62	26.37	25.44
Na ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.08
K ₂ O	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.02
total	95.80	96.49	96.46	97.66	92.22	91.92	92.39	95.14	94.90	95.49
(cation No.)										
Si	3.112	3.128	3.121	3.082	6.378	6.209	6.147	3.051	3.070	3.111
Ti	0.000	0.003	0.000	0.004	0.004	0.007	0.002	0.004	0.006	0.003
Al	2.264	2.454	2.321	2.531	3.694	4.151	4.437	1.815	1.731	1.667
Fe	0.833	0.539	0.740	0.514	1.638	1.330	1.224	0.161	0.243	0.327
Mg	0.005	0.003	0.003	0.005	0.591	0.615	0.296	0.003	0.000	0.005
Mn	0.009	0.005	0.006	0.010	0.007	0.012	0.005	0.001	0.001	0.001
Ca	2.033	1.966	2.024	1.988	3.936	3.879	4.019	2.003	2.007	1.934
Na	0.000	0.000	0.002	0.000	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.011
K	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.005	0.003	0.000	0.000	0.002
total oxygen No.	8.258	8.098	8.220	8.137	16.258	16.216	16.134	7.038	7.059	7.059
		12.5				24.5			11.0	

sample (wt %)	chlorite				Ca-amphibole					
	M0	M4	A3	A10	M4	M4	A4	A4	A9	A9
SiO ₂	29.08	28.95	26.96	26.26	49.54	49.17	51.90	51.33	46.73	45.88
TiO ₂	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.07	---	---	---	0.03
Al ₂ O ₃	17.26	16.72	19.62	18.88	3.98	5.90	2.51	4.38	7.90	10.55
FeO	17.82	24.03	23.13	26.36	17.44	15.84	16.54	17.64	18.72	19.55
MgO	21.10	16.64	16.01	14.27	11.57	11.68	12.67	11.61	8.92	7.61
MnO	0.22	0.24	0.31	0.32	0.26	0.25	0.38	0.35	0.33	0.34
CaO	0.20	0.12	0.23	0.07	12.17	12.02	12.63	12.44	12.15	11.71
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.39	0.30	0.51	0.35	0.70
K ₂ O	0.00	0.03	0.09	0.06	0.26	0.22	0.18	0.24	0.41	0.50
total	85.67	86.71	86.36	86.22	95.82	95.54	97.11	98.51	95.52	96.87
(cation No.)										
Si	6.013	6.109	5.700	5.674	7.468	7.385	7.690	7.532	7.152	6.943
Ti	0.000	0.000	0.002	0.000	0.007	0.008	---	---	---	0.003
Al	4.206	4.158	4.894	4.808	0.707	1.044	0.439	0.758	1.424	1.882
Fe	3.080	4.240	4.090	4.762	2.198	1.989	2.050	2.165	2.396	2.474
Mg	6.502	5.234	5.046	4.595	2.599	2.615	2.798	2.539	2.036	1.717
Mn	0.039	0.043	0.056	0.058	0.034	0.032	0.048	0.043	0.043	0.044
Ca	0.044	0.026	0.051	0.015	1.965	1.934	2.005	1.956	1.993	1.898
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.159	0.114	0.087	0.145	0.104	0.206
K	0.000	0.007	0.024	0.017	0.049	0.042	0.033	0.047	0.080	0.096
total oxygen No.	19.884	19.816	19.863	19.930	15.186	15.163	15.150	15.185	15.228	15.264
		28.0					23.0			

緑簾石, パンペリー石, ブドウ石は全鉄を Fe₂O₃ として, 緑泥石とカルシウム角閃石は全鉄を FeO とし
て計算した.

第2図 カルシウム角閃石の組成。

r は最も縁に近い部分の分析値を示す。Fe* は全鉄。

累帯構造も温度上昇期に形成されたものと考えられる。

(4) カルシウム角閃石 カルシウム角閃石は残留単斜輝石の縁と緑泥石中に針状結晶として生じている。後者は幅 $3\mu\text{m}$ 以下の細粒結晶であるため分析値が得られない。前者を単斜輝石の縁から基質に向かって2ないし3点分析を行った結果、ブドウ石やパンペリー石と共存するものでも著しくAlに富むものがあることが明らかになった。Al含有量は一般に単斜輝石の縁に近い部分で高く、酸素数23に対して最大1.9程度、基質の緑泥石と接する部分でも1.1程度含まれることがある。分析値を詳細に検討すると、NaとKはそれぞれ0.2と0.1以下と低く、Caは1.9から2.0の間で一定しており、 $\text{Fe}^* + \text{Mg}$ はAlとほぼ1:2の割合で変化している(第2図)。したがってAlはアクチノ閃石に対して主としてチェルマク閃石成分として含まれていることがわかる。カルシウム角閃石のAl含有量は、変成温度の上昇に伴って増加することが知られており、分析に用いた試料の場合も高温側のものほどAl含有量が高い。以降の議論では、各試料のAl含有量の高い部分を高温時の組成と考えてカルシウム角閃石の組成を代表させ、酸素数23に対してAlが1を越えて含まれるものをチェルマク閃石と呼ぶことにする。なおアクチノ閃石とチェルマク閃石を光学的に識別することは難しく、両者の間

に不混和領域が存在することを示す観察や分析値は、現在のところ得られていない。

(5) その他の変成鉱物 緑泥石は基質やアミグダル中で $10\mu\text{m}$ 以下の細粒結晶の集合体をなし、大部分は青灰色の異常干渉色を示す。緑泥石の $\text{Fe}/(\text{Fe} + \text{Mg})$ 比は0.39から0.58までの幅を持っているが、大半は0.45から0.55の範囲に入る。同一試料内部の組成のばらつきは0.03以内であり、他の変成鉱物と比較して均質である。

アルバイトは原岩の斜長石を置き換えた長柱状結晶か、基質においてモザイク状の集合体をつくっている。 $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})$ 比は、最も高温側の試料においても0.03以下であり、オリゴクレスは見出されていない。

白雲母(フェンジャイト成分を含む)、スフェーンは全試料に少量含まれる。石英は70—80%の試料に含まれるが、再結晶の進んでいない溶岩、貫入岩には確認されないことが多い。方解石、硫化鉄鉱物は半数以上の試料に少量ずつ含まれている。

鉱物組合せ

低温の塩基性変成岩の相解析では、 SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , および H_2O の10成分系が用いられる。このうち石英とアルバイトが

過剰に存在する系では、 SiO_2 と $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ は過剰成分とみなされる。 TiO_2 と K_2O は、スフェーンと白雲母にのみ含まれ、無関与成分とみなされる。また、共存する流体が H_2O によって満たされ、流体圧が固相圧に等しかったと仮定すると、系は Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , および CaO の5成分系に縮少できる。

5成分系による取り扱いのため、得られた試料のうち石英、アルバイトを過剰に含むものを選び出し、第3図に示した。除外された試料は大半が再結晶の進んでいない溶岩であり、第3図の組合せの部分的な組合せを持っている。一方、残された試料のすべてに緑簾石と緑泥石が含まれているため、組合せの違いはブドウ石、パンペリー石、カルシウム角閃石の有無によって示される。なお、カルシウム角閃石がアクチノ閃石であるか、チェルマク閃石であるかの判定は、大量の分析値を必要とするため、ブドウ石またはパンペリー石と共存するものについて分析を行い、判定結果を第3図に示した。

鉱物組合せの特徴は、以下のようにまとめられる。

1. SEKI *et al.* (1969, 1971) によるⅢ帯とⅣ帯の境界と、試料を採取したルートが確実に交差している世附川、大又沢、三保ダムの3地域では、高温側で、

緑簾石+カルシウム角閃石、
低温側で、

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石、
という緑色片岩相とブドウ石—パンペリー石相の組合せがそれぞれ多く認められ、従来の研究と基本的には一致した結果が得られた。寄と長者舎の両地域は、従来の分帯が精度良く行われていないことや、断層等により構造が複雑になっていることなどが原因で、変成度の変化が不明瞭であり、試料を採取した地点は緑色片岩相に達していないと考えられる。

2. 5つの地域には、いずれも緑色片岩相とブドウ石—パンペリー石相の中間的な鉱物組合せが認められる。

緑簾石+パンペリー石+アクチノ閃石、の組合せは、三保ダムを除く各地域に認められ、低温側に多い。

緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石、の組合せは、三保ダム地域の中—低温部と寄地域に認められる。

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石+アクチノ閃石、の4相共存の組合せは、地域によって数に差はあるが、全地域に認められる。

チェルマク閃石を含む組合せは、高温側に見つかっており、パンペリー石と共存するものが世附川、大又沢両地域で、ブドウ石と共存するものが三保ダム地域で確認

第4図 鉱物組合せの違いと共存する緑泥石の組成の関係。

緑泥石は1試料につき4~5点を分析した。
E: 緑簾石, P: パンペリー石, R: ブドウ石, Ca-amp: カルシウム角閃石。

された。

以上のような中間的組合せは、幅 300—500 m という比較的広い地域で確認されており、「両帯の境界が実際にはかなりの幅、斬移部を持つと考えられる(坂野・関, 1979).」という指摘が裏付けられた。

3. 中間的な鉱物組合せの分布は、5つの地域で必ずしも共通していない点が注目される。変成度の変化が明瞭な、世附川、大又沢両地域と、三保ダムを比較すると、前者ではパンペリー石とカルシウム角閃石の共存する部分が幅広く存在しているのに対し、後者ではブドウ石とカルシウム角閃石の共存する部分の幅が広い。

考 察

前節で述べた中間的な組合せのうち、

緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石、

の組合せは、バンクーバー島の接触変成作用 (KUNIYOSHI & LIU, 1976) や、先カンブリア系の埋没変成作用 (SMITH *et al.*, 1982) など、低圧型の変成帯と考えられる地域に報告されている。一方、

緑簾石+パンペリー石+アクチノ閃石、

の組合せは、中—高圧型変成帯に特徴的なパンペリー石—アクチノ閃石相(橋本, 1966)の組合せである。

以下の考察では、まずこの2種類の中間的な組合せを持つ試料について、Ca-Al 含水珪酸塩鉱物の組成と変成度の関係を検討する。続いて SCHREINEMAKERS の東

第5図 共存する緑簾石とパンペリー石の組成変化.

〔A〕: 緑簾石, 〔B〕: パンペリー石. 大又沢地域において, 緑簾石+パンペリー石+カルシウム角閃石の組合せを持つ試料の分析値. A1~A10 は第3図の試料番号, r は緑の組成を示す.

を用いて各地域の変成条件の違いを考察し, これにもとづいた変成作用のモデルを提案する.

なお議論における塩基性岩の系の取り扱いについて, MgO と FeO が各鉱物間で自由に置換できるものとし, $RO = FeO + MgO$

を1成分とした Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, RO の4成分系を用いることにする. この系を用いた場合に前述の鉱物組合せの大部分が divariant(自由度2)な組合せとして容易に表現できる. しかし, Mg- Fe^{2+} 置換をする鉱物の扱いでは定量性をそこなう可能性が残される. そこで, 前述の各鉱物組合せについて, 共存する緑泥石の Fe/(Fe+Mg)比を比較した(第4図). その結果, 各組合せにおける緑泥石の組成領域は大幅に重複し合っており, 鉱物組合せによる系統的な組成の違いは認められない. したがって, 4成分系で取り扱うことによる問題は無視しうると判断した. また, RO は緑泥石に過剰に含まれるため, 共生関係の表現方法は Al- Fe^{3+} -Ca のダイアグラム(BROWN, 1977)を用いる.

1. 中間的組合せにおける Ca-Al 含水珪酸塩鉱物の組成変化

(緑簾石+パンペリー石+カルシウム角閃石)

この組合せは大又沢地域に多数見出される. この地域で, 共存する緑簾石とパンペリー石の分析値を試料採取地の順に並べて比較した結果を第5図に示す.

緑簾石がパンペリー石およびアクチノ閃石と共存する場合, 緑簾石の組成が温度に対して敏感に変化することは, 四国三波川帯において NAKAJIMA *et al.* (1977) で詳しく論じられている. 第5図で明らかなように, 低圧型変成帯の典型と言われる丹沢山地においても, 緑簾石の組成が石英閃緑岩体へ向かって連続的に Al 端成分側へ

変化し, 変成度の指標となることを示している. しかし, 三波川帯ではパンペリー石の組成は, Al 端成分で代表しうる程度に Al に富んでいるのに対し, 丹沢山地のパンペリー石は相対的に Fe^* に富んでおり, 緑簾石と同様に変成度の上昇に伴って敏感に Al, Mg 側へ移動していることがわかる. これは緑簾石とパンペリー石の Al- Fe^{3+} 分配が両変成帯で異なっていることを意味しており, この組合せの安定な温度が異なっていることを示唆している.

大又沢地域では, パンペリー石と共存する緑簾石の $Fe^{3+}/(Al+Fe^{3+})$ は 0.16 が下限であり, これより石英閃緑岩体側では,

緑簾石+カルシウム角閃石

という緑色片岩相の組合せが安定となる.

なお第5図において緑簾石とパンペリー石の組成が, 試料番号 A4 と A5 の間で不連続となることが明瞭に識別される. これは両試料採取地の間に野外で未確認の断層が存在し, 同じ変成度を持つ岩石がルート上で繰り返し出現していることを暗示している.

(緑簾石+ブドウ石+カルシウム角閃石)

この組合せは三保ダム地域に比較的多く認められる. この地域の緑簾石とブドウ石の組成を, 試料採取地の順に並べて比較した結果を第6図に示す.

この組合せの場合も, 緑簾石とブドウ石は石英閃緑岩体へ向かって Al が増加する傾向があり, 両鉱物の組成が変成度の指標になることを示している. 三保ダム地域では, ブドウ石と共存する緑簾石の $Fe^{3+}/(Al+Fe^{3+})$ 比は, 0.17 が下限であり, これより高温側はブドウ石は不安定になり, 緑色片岩相の組合せだけが安定になると考えられる.

第6図 共存する緑簾石とブドウ石の組成変化.

[A]: 緑簾石, [B]: ブドウ石. 三保ダム地域において, 緑簾石+ブドウ石+カシルウム角閃石の組合せを持つ試料の分析値. M1~M5 は第3図の試料番号, r は緑の組成を示す.

第7図 大又沢, 三保ダム両地域の鉱物共生関係の変化.

BROWN(1977)の $\text{Al}-\text{Fe}^{3+}-\text{Ca}$ ダイアグラムを用いて投影. E: 緑簾石, P: パンペリー石, R: ブドウ石, A: アクチノ閃石, T: チェルマク閃石. 破線は化学分析によって確認されていない鉱物共生を示す.

(大又沢, 三保ダム両地域の鉱物共生)

以上のような分析結果をもとに, 大又沢, 三保ダム両地域の鉱物共生関係を表現した(第7図). 三保ダム地域のパンペリー石の消滅反応は,

パンペリー石=緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石(石英, 緑泥石, H_2O 過剰),

という univariant(自由度1)の反応であり, 野外でも明瞭なアイソグラッドとして表現しうる. これに対し, 大

又沢地域のパンペリー石の消滅は,

緑簾石+パンペリー石+カルシウム角閃石の3相領域が Al 側へ移動することによる divariant(自由度2)の反応であるため, 原岩の組成に依存する. 同様に, 三保ダム地域のブドウ石の消滅は,

緑簾石+ブドウ石+カルシウム角閃石,

大又沢地域のブドウ石の消滅は,

緑簾石+パンペリー石+ブドウ石,

第2表 SCHREINEMAKERS 分析に用いた各鉱物の組成とモル体積.

Phase	Al	Fe ³⁺	Ca	R	Si	H	molar volume (cm ³)	
pumpellyite	4.5	0.5	4	1	6	7	297.3	(3) (4)
prehnite	2	—	2	—	3	2	141.1	(1)
epidote	2.55	0.45	2	—	3	1	137.5	(5)
actinolite	—	—	2	5	8	2	272.9	(2)
tschermakite	2	—	2	4	7	2	272.6	(2)
chlorite	5	—	—	9.5	5.5	16	417.2	(2) (3)
quartz	—	—	—	—	1	—	22.69	(2)
fluid	—	—	—	—	—	2	19.83	(6)

(1) : LIOU (1971), (2) ROBBIE *et al.* (1979), (3): SCHIFFMAN & LIOU (1980), (4): PASSAGLIA & GOTTERDI (1973), (5) BIRD & HELGESON (1980), (6) HELGESON & KIRKHAM (1974).

第3表 不変点から発する一変数曲線(反応式)と(圧力/温度)勾配.

	r	e	a	c	t	i	o	n		dP/dT [bar/deg]
(E), (P)	0.38 R + 0.31 A + 0.16 C + 0.50 Q	=	0.69 T +		fluid					90.4
(R)	0.26 P + 0.13 A + 0.08 C + 0.49 Q	=	0.29 E + 0.36 T +		fluid					48.0
(A)	0.45 P + 0.01 C + 0.49 Q	=	0.26 R + 0.50 E + 0.14 T +		fluid					36.1
(T)	0.56 P + 0.48 Q	=	0.42 R + 0.62 E + 0.08 A + 0.02 C +		fluid					31.5

鉱物名の略号は第2表による. 係数は流体相 (fluid=H₂O) 1 モルに対して標準化した. 緑簾石を伴わない反応 (E) とパンペリー石を伴わない反応 (P) は縮退して同一の反応になっている.

というそれぞれの三相領域が Al 側へ移動することによる divariant の反応であり, 組成依存性があるため, 緑簾石の組成を固定するなどしてアイソグラッドとしなければならない.

このようにブドウ石—パンペリー石帯から緑色片岩帯の共生関係の変化は, 地域によって明らかに異なっている.

2. SCHREINEMAKERS' 分析

各地域の化学的条件を一定にしているにもかかわらず, 地域によって共生関係の違いを生み出す原因は, 変成時の外的条件の違いがあると考えざるを得ない. そこで以下の手順によって SCHREINEMAKERS' 分析を行い, 各地域の変成条件の違いを考察した.

(1) 取り扱う系は, SiO₂, H₂O, NaAlSi₃O₈, R_{9.5}Al₅Si_{5.5}O₂₀(OH)₁₆ を過剰成分とした Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO の3成分系とする.

(2) 取り扱う相は, 緑簾石, ブドウ石, パンペリー石, アクチノ閃石, およびチェルマク閃石の5相とする. このうち緑簾石, ブドウ石, パンペリー石は, 温度の上昇に伴って組成が著しく変化するが, 計算のために組成を固定しなければならない. しかし, 第7図に示されるように, どの地域の化学組成を用いた場合でも, 3成分系ダイアグラム上における5相のトポロジーは一定

しており, 定性的な議論の範囲では問題はない. ここでは, チェルマク閃石の出現する付近の各相の分析値を計算に用いる(第2表).

(3) 3成分5相系では, 温度—圧力空間上においてひとつの不変点から5本の一変数曲線が射出する反応曲線網を描くことができる. 反応曲線の勾配は, CLAUSIUS-CLAPEYRON の式, $dP/dT = \Delta S / \Delta V$ によって表わされるが, 反応に伴うエントロピー変化は, 主として含水鉱物が脱水する際のエントロピー変化であり, 氷から水への変態のエントロピー変化の値に近似できるため, 平島 (1983) と同様に, FYFE *et al.* (9158) による 12 cal/deg·mol (350°C, 2.5 kb の値) を使用した. また流体相の体積については HELGESON & KIRKHAM (1974) の 350°C, 2.5 kb の値を用いた.

計算の結果得られた反応式とその勾配を第3表に, SCHREINEMAKERS の束を第8図(A)に示す.

5本の一変数曲線のうち, 緑簾石を含まない反応(第8図の(E))は, 第3図に示した全試料の鉱物組合せが緑簾石を含んでいるため, 丹沢山地の共生関係を検討する場合には検出しえない. したがって, 温度—圧力空間は, 実質的に4つのグリッドに区分される(第8図(B)). 各グリッドに安定な divariant の鉱物組合せは,

(I) グリッド——低温高圧側,

第8図 [A] SCHREINEMAKERS の束と鉱物共生関係. [B] 温度—圧力グリッドと各地域の鉱物共生の対応関係.

鉱物名と一変数曲線の略号は、第2表と第3表による。(I)～(IV)は本文中の温度—圧力グリッドと対応する。

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+パンペリー石+アクチノ閃石,

(II) グリッド——高温高压側,

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+パンペリー石+チェルマク閃石,

緑簾石+アクチノ閃石+チェルマク閃石,

(III) グリッド——低温低压側,

緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石,

(IV) グリッド——高温低压側,

緑簾石+ブドウ石+チェルマク閃石,

緑簾石+アクチノ閃石+チェルマク閃石,

である。これらの組合せのうち、(II)と(IV)のグリッドに安定な、

緑簾石+アクチノ閃石+チェルマク閃石,

の組合せは、得られた試料において2種類のカルシウム角閃石が連続固溶体をつくるか、間に不混和領域を持つかが不明であるので、第3図の組合せにはそのまま適用できない。しかし、

緑簾石+カルシウム角閃石

という緑色片岩相の組合せを調和的である。

各地域の鉱物組合せを温度—圧力グリッドに対比した結果は、以下のようにまとめられる。

(世附川地域と大又沢地域)

両地域では低温部で、

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+パンペリー石+アクチノ閃石,

の2種類の組合せが存在する。高温部では、

緑簾石+パンペリー石+チェルマク閃石,

の組合せが認められ、緑色片岩相の組合せが広く分布している。これはグリッド(I)から(II)へ累進的に変成条件が変化する温度—圧力曲線によって示される。

(三保ダム地域)

三保ダム地域では、低温側から高温側へ、

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石,

緑簾石+ブドウ石+チェルマク閃石,

の順に鉱物組合せが変化し、高温部には緑色片岩相の組合せが広く分布している。これはグリッド(I)から(III),

さらに(Ⅳ)へ累進的に変成条件が変化する温度—圧力曲線によって示される。

(寄地域)

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+パンペリー石+アクチノ閃石,

の2種類の3相共存の組合せが認められ, グリッド(Ⅰ)の変成条件を示している。また,

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石+アクチノ閃石,

の4相共存の組合せが多く, これはグリッド(Ⅰ)と(Ⅲ)の境界の univariant の組合せであるが, 分布と変成度との対応が不明瞭であるため, 更に検討を要する。この地域は基本的にグリッド(Ⅰ)の変成条件を示すと考えられ, 緑色片岩相に達していない。

(長者舎地域)

緑簾石+ブドウ石+パンペリー石,

緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石,

の2種類の3相共存の組合せがみられる。付近に北東—南西方向の断層が多数存在しているため, 変成度と組合せの対応が不明瞭であるが, グリッド(Ⅰ)と(Ⅲ)の変成条件を示す岩石が混在すると考えられる。緑色片岩相には達していないと思われる。

各地域の変成条件を第8図(B)に示す。石英閃緑岩体南西側の世附川, 大又沢両地域は, 不変点より高压側の温度—圧力曲線を持つのに対し, 岩体南側の三保ダム地域と, 北東側の長者舎地域は, 不変点より低压側の温度—圧力曲線を持っている。

3. ダイアピルモデル

以上のような変成帯内部における温度—圧力曲線の違いは, 丹沢山地の変成作用と構造発達史にとって2つの重要な意味を持っている。

(1) 丹沢山地の変成帯は, 南西部に向かって変成作用時の深部が現在地表に現われている。つまり, 丹沢山地の変成作用が最高温時に到達して以降, 現在の丹沢山塊が形成されるまでの間に, 南西側がより大きな隆起量を持って上昇したことを示している。

(2) 変成作用の基本的なメカニズムは, 杉山(1976)などによる埋没変成作用を考えた場合, 温度, 圧力がともに地下深部へ向かって上昇することになるため, 温度—圧力曲線に地域的な違いがあることを説明しにくい。これにかかわって, 変成帯内部の等温面と等圧面が交差するモデルが必要となる。この場合, 石英閃緑岩体が熱源となって側方より熱を供給し, 地下深部へ向かって静水圧が上昇するという接触変成作用が最も考えやすい。少なくともブドウ石—パンペリー石帯と緑色片岩帯の境界部より石英閃緑岩体に近い高温側の変成岩類は,

第9図 石英閃緑岩ダイアピル, 地質構造, および変成作用の模式的関係。

5つの調査地の石英閃緑岩ダイアピル形成時におけるダイアピルとの深度関係を模式的に表現した。丹沢山地が西側でより大きな隆起量を持って上昇したため, 西側の調査地ほどより深部の変成条件を示しており, 石英閃緑岩体の岩相, 丹沢層群の地質構造もダイアピルの形状と調和的に表現される。

このような特殊な状況下に形成されたと考えられる。

変成岩類の温度構造と, 石英閃緑岩体の岩相, 丹沢層群の地質構造などを統一的に説明する変成作用のモデルとして, 石英閃緑岩ダイアピルの上昇に伴う変成作用を提案する。第9図にダイアピルの様々な地質現象の関係を模式的に示し, このモデルの合理性を以下に述べる。

(1) 熱源が側方に存在し, 地下深部へ向かって圧力が増大するため, SCHREINEMAKERS の東をつくる4本の一変数曲線は, ダイアピルの側方から分かれて射出することが可能となる。これによって, 西部から東部へ, すなわち深部から浅所へ, 5つの地域の鉱物共生を矛盾なく表現できる。

(2) 石英閃緑岩体が西部から東部へ次第に斑状組織の発達する浅所の岩相を示し, 岩体東部にルーフペンダントが存在していることと調和する。

(3) 丹沢層群が石英閃緑岩体を取り巻くようなドーム構造を持っていること, またダイアピル側方から下方にあたる三保ダム, 大又沢, 世附川地域付近で層序が逆転し, 寄地域周辺で層理がほぼ直立し, ダイアピル上方

第 10 図 丹沢山地南部三保ダム～大又沢地域のカルシウム角閃石の分布。

“actinolite + hornblende” は、複合結晶の確認された試料の位置を示す。

の長者舎地域が正層序であることを表現できる。

(4) 結晶片岩の形成には、塑性変形をもたらすだけの温度と差応力が必要である。ダイアピルの周囲では、ダイアピル上方から側方への物質流が生じるため、石英閃緑岩体南側は歪みが最も進行する位置に対応すると考えられる。さらにダイアピル上方にあたる岩体北東側の地域は、歪み量が少なく、ホルンフェルス化し、ルーフペンダントが形成されたとみられる。

4. 結晶片岩地帯の形成史

従来丹沢山地の変成作用を重複変成作用と考えていた論拠に、石英閃緑岩体中に結晶片岩が捕獲されていることや、片理面、層理面が接触面と斜交する地域があることがあげられている。これらは片理面の形成が何によるものかが考察されない限り、状況証拠となる。そこで石英閃緑岩体南側の緑色片岩帯から角閃岩帯に相当する結晶片岩地帯で、片理や線構造をつくっている変成鉱物の組織とその方向性を観察し、片理面や線構造の形成期について考察を加えた。

結晶片岩地帯において片理や線構造をつくっている鉱物は、緑色片岩帯ではアクチノ閃石と緑泥石、角閃岩帯では普通角閃石である。SUGI(1931)に報告されているように、緑色片岩帯と角閃岩帯の境界部付近で、アクチノ閃石を核とし、普通角閃石の縁を持った試料を多数採取できる(第 10 図)。累帯構造は光学顕微鏡でも容易に観察されるが、アクチノ閃石に対して普通角閃石が相対的に Fe に富んでいるため、二次電子線像では鮮明にとらえることができる(図版 I-f)。

第 10 図に示した累帯構造を持つ 13 の試料のうち、5 試料が緑簾石、緑泥石、磁鉄鉱、斜長石、および石英

を含んでおり、残る 8 試料は緑泥石、磁鉄鉱、石英のいずれかを欠いた部分的な組合せを持っている。アクチノ閃石から普通角閃石を生ずる反応は、普通角閃石 1 モルに対して、

(アクチノ閃石 + 斜長石 + 緑簾石 + 緑泥石 = 普通角閃石 + 磁鉄鉱 + 石英 + 流体)。

という形で表わされる。変成反応は一般に累進変成過程で脱水反応となるため、普通角閃石は高温側の生成物であり、角閃石の累帯構造は温度上昇期に形成されたものであると判断できる。

ところで、累帯構造を持った角閃石を詳しく観察すると、単斜輝石斑晶をアクチノ閃石が置き換え、さらにその縁に生じた普通角閃石が片理面方向に成長しているもの(図版 I-g)や、アクチノ閃石の pull-apart に普通角閃石を生じているもの(図版 I-h)が見つかる。これらは温度上昇期に岩石の塑性変形が進行していたことを示している。SUGI(1931)は、累帯構造の縁に生じた普通角閃石の成因を、石英閃緑岩体の貫入による変成作用に求めたが、普通角閃石の方がより動的な場で形成されたことがわかる。前述のように、緑色片岩相より高温側の鉱物共生は、ダイアピルによる温度構造に支配されていたと考えられるため、片理面と鉱物線構造の形成はダイアピル上昇期に進行していたと考えられる。

石英閃緑岩体に結晶片岩が捕獲されていることと、片理と鉱物線構造の形成がダイアピルの上昇による累進的変形プロセスであることは矛盾しない。ダイアピルの上昇を数十万年、数百万年というオーダーで考えれば、丹沢層群の変成作用が開始されて今日に至る丹沢山地の構造発達史の中で、ダイアピル上昇過程は大きな時間的比率を持っていたと思われる。石英閃緑岩体は上昇過程において周囲に変成作用を与える一方、すでに片理面の形成された周囲の岩石を捕獲したとしても不自然ではない。

ところで、角閃石の伸長による結晶片岩の線構造が、一般に北西方向の落ちを示すことが、杉山(1976)などによって述べられている。しかし、その方向の持つ構造発達史上の意義についてはまだ言及されていない。

線構造のうち断層周辺や節理面に沿って認められるものは、緑泥石等の粘土鉱物によるものが多く、比較的最近の構造に支配されていると考えられる。しかし、明瞭

第 11 図 角閃石の伸長方向によって特徴づけられる線構造の方向の分布。

矢印の向きと数字は線構造の“落ち”の向きと傾斜角度を示す。

な片理面内に観察される角閃石の伸長方向は、片理面の方向とほぼ一致しており、片理面形成期における累進的な変形の歪み楕円の長軸と短軸方向に一致していることが期待される。そこで、石英閃緑岩体南側を中心に、十数箇所測定した角閃石の伸長方向を第 11 図に示す。測定結果は若干の例外を除いて西ないし北西方向を落ちを示しており、従来の研究と一致する。この方向は、図版 I-g にも示されるようなせん断変形方向であり、石英閃緑岩ダイアピルの上昇方向と考えられる。したがって、結晶片岩形成期にダイアピル側方で形成された鉱物線構造が、丹沢山地全体が東へ傾動しながら隆起したために、現在西ないし北西方向の落ちを示すようになったと解釈される。

丹沢山地のテクトニクス

以上の考察結果のまとめとして、最近の南部フォッサマグナ地域の諸研究を考え合わせ、丹沢山地のテクトニクスを概観する。構造発達史のモデルを第 12 図に示す。

(1) 中新世前～中期、大規模な火山活動によって丹沢層群が厚く堆積した。丹沢層群をつくる火山岩類は、巨摩、御坂山地に分布する同時代の堆積物と比較して、粗粒の火砕岩を主体としており、伊豆半島の基盤をなす湯ヶ島層群の堆積物に類似している(松田, 1980)。したがって、丹沢層群は伊豆—マリアナへと連続する島弧の

第 12 図 丹沢山地の構造発達史モデル。

〔A〕 丹沢層群堆積期。

〔B〕 石英閃緑岩ダイアピル形成期。

〔C〕 伊豆地塊の衝突と丹沢山地の傾動隆起の時期。

一部として形成されたと思われる(第 12 図(A))。

(2) 中新世中期以降、石英閃緑岩体が貫入を開始した。岩体上昇し、ダイアピルを形成するのに伴って、丹沢層群はドーム状構造を形成し、南側地域は広域的に逆転した。丹沢層群の火山岩類はダイアピルからの熱によって角閃岩相までの変成作用を受ける。この変成作用は熱源が側方に存在するため、深度によって温度—圧力曲線が異なるという特殊性を持っている。ダイアピル上方は、水平引張応力下におかれてルーフペンダントが形成され、周囲の岩石はホルンフェルス化する。一方ダイアピルの側方から下方は、ダイアピルの上昇に伴う熱と

差応力によって塑性変形し、結晶片岩が形成された(第12図(B)).

(3) 中新世後期の足柄層群の堆積期には丹沢山地は隆起を開始しており、足柄層群に堆積物を供給していた。また、鮮新世にはすでに石英閃緑岩体の一部も地表に露出していた(SEKI *et al.*, 1969, 1971)。この構造運動は、伊豆地塊の本州弧への衝突(MATSUDA, 1978)や神縄断層の活動など、丹沢山地がプレート境界に近接していたことに深く関係している。丹沢山地の隆起速度は南西部で大きく、山地全体が東へ傾動するように隆起した。その結果、石英閃緑岩体と周囲の変成岩類は、南西部へ向かってより深部が露出する分布形態を持つに至った(第12図(C)).

文 献

- 饗場清文, 1982: 四国中西部秩父果帯北帯, 中津・名野川地域の三波川変成作用. 地質雑, **88**, 875-885.
- 坂野昇平・関陽太郎, 1979: 変成作用の熱力学的解析. 岩波講座地球科学 4, 松井義人・坂野昇平編, 岩波書店, 東京.
- BIRD, D. K. and HELGESON, H. C., 1980: Chemical interaction of aqueous solutions with epidote-feldspar mineral assemblage in geologic system, (1) Thermodynamic analysis of phase relations in the system $\text{CaO-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$. *Amer. Jour. Sci.*, **280**, 907-941.
- BROWN, E. H., 1977: Phase equilibria among pumpellyite, lawsonite, epidote and associated minerals in low grade metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **64**, 123-136.
- FYFE, W. S., TURNER, E. J. and VERHOOGEN, J., 1958: Metamorphic relations and metamorphic facies. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **73**.
- 橋本光男, 1966: ブドウ石 パンペリー石変成グレイワッケ相. 地質雑, **72**, 253-265.
- HELGESON, H. C. and KIRKHAM, D. H., 1974: Theoretical prediction of thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressure and temperatures, I. Summary of the thermodynamic/electrostatic properties of the solvent. *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 1089-1198.
- 平島崇男, 1983: SCHREINEMAKERS の東の方法を用いた藍閃変成作用の鉱物共生関係の解析. 地質雑, **89**, 679-691.
- 河野義礼・植田良夫, 1966: 本邦産火成岩の K-Ar dating, (IV) 東北日本の花崗岩類. 岩鉱, **56**, 41-55.
- KUNYOSHI, S. and LIOU, J. G., 1976: Contact metamorphism of the Karmutsen Volcanics, Vancouver Island, British Columbia. *Jour. Petrol.*, **17**, 73-99.
- LIOU, J. G., 1971: Synthesis and stability relations of prehnite. *Amer. Mineral.*, **56**, 507-351.
- MATSUDA, T., 1978: Collision of the Izu-Bonin arc with central Honshu, Cenozoic tectonics of the Fossa Magna. *Japan. Jour. Phys. Earth.*, **26**, 409-421.
- 松田時彦, 1980: 新生代後期の地層群. 岩波講座地球科学 15. 勘米良亀齡・橋本光男・松田時彦編, 岩波書店, 東京.
- MIKAMI, K., 1961, 1962: Geological and petrological studies on the Tanzawa Mountainland, (1), (2). *Sci. Rep., Yokohama Nat. Univ.*, **6**, 57-110, **9**, 59-108.
- 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. *Jour. Petrol.*, **18**, 263-284.
- PASSAGLIA, E. and GOTTERDI, G., 1973: Crystal chemistry and nomenclature of pumpellyites and juldolites. *Can. Mineral.*, **12**, 219-223.
- ROBIE, R. A., HEMINGWAY, B. S. and FISHER, J. R., 1979: Thermodynamic properties of minerals and related substances of 298.15 K and 1 bar (10^5 pascals) pressure and higher temperature. *U. S. Geological Survey Bulletin* **1452**.
- SCHIFFMAN, P. and LIOU, J. G., 1980: Synthesis and stability relation of Mg-Al pumpellyite, $\text{Ca}_4\text{Al}_5\text{-MgSi}_6\text{O}_{21}(\text{OH})_7$. *Jour. Petrol.*, **21**, 441-474.
- SEKI, Y., OKI, Y., MATSUDA, T., MIKAMI, K. and OKUMURA, K., 1969: Metamorphism in the Tanzawa Mountains, central Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **61**, 1-75.
- , ———, ONUKI, H. and ODAKA, S., 1971: Metamorphism and vein minerals of North Tanzawa Mountains, central Japan. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **66**, 1-21.
- SMITH, R. E., PERDRIX, J. L. and PARKS, T. C., 1982: Burial metamorphism in the Hamersley Basin, Western Australia. *Jour. Petrol.*, **33**, 75-102.
- SUGI, K., 1931: On the metamorphic facies of Misaka series in the vicinity of Nakagawa Prov., Sagami. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, **9**, 87-142.
- 杉山 明, 1976: 丹沢山地の地質構造発達史, (1) 層序および構造. 地質雑, **82**, 699-712.
- 滝田良基, 1974: 丹沢トータル岩複合岩体の岩石記載と岩体形成史. 地質雑, **80**, 505-525.
- 丹沢団体研究グループ, 1973: 丹沢山地のグリーンタフに関する研究, (その1) 北部地域の層序と構造. 地質学論集, no. 9, 55-68.
- , 1975: 丹沢山地のグリーンタフに関する研究, (その2) 南部結晶片岩地域の層序と構造. 地球科学, **29**, 130-147.
- , 1976: 丹沢山地のグリーンタフに関する研究, (その3) 南西部地域の層序と構造. 地質学論集, no. 13, 299-311.

(要 旨)

荒井 融, 1987: 丹沢山地のテクトニクス—変成岩類の相解析による考察—. 地質雑, 93, 185-200. (ARAI, T., 1987: Tectonics of Tanzawa Mountains—constraints from metamorphic petrology—. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 93, 185-200.)

丹沢山地の変成岩類のうち, ブドウ石—パンペリー石相と緑色片岩相の境界部付近の鉱物共生関係を考察した. 石英閃緑岩体東側地域には緑簾石+ブドウ石+アクチノ閃石のより低圧で安定な組合せがみつかると. 高温部ではチェルマク閃石成分に富む普通角閃石とパンペリー石またはブドウ石の共存する岩石を見出した. SCHREINEMAKERS の束を用いて組合せを検討した結果, 丹沢山地西部の変成岩は, より高圧の温度—圧力曲線で示される.

丹沢山地南部の結晶片岩地帯には, アクチノ閃石が普通角閃石に縁どられ, 普通角閃石が片理や線構造をつくっている構造が観察される. 角閃石の鉱物線構造は石英閃緑岩体の貫入方向を示すと考えられる. これらの事実, 石英閃緑岩ダイアピルの上昇によって岩石が塑性変形し, 結晶片岩地帯が形成されたことを示している.

図 版 説 明

第 I 図版

変成鉱物の二次電子像

白く輝く部分は平均原子番号が大きいことを示している. $Mg \leftrightarrow Fe^{2+}$ 置換, $Al \leftrightarrow Fe^{3+}$ 置換を伴う固溶体鉱物では, 平均原子番号の差異が大きくなるため, Fe に富む部分が明るく見える.

- (a) 緑簾石: 曹長石中で不規則な累帯構造と形状を示す.
- (b) 緑簾石: 緑泥石中で自形をなし, 縁へ向かって Al の増加する累帯構造を示す.
- (c) ブドウ石: 自形結晶の集合体をなす. 中心部が Fe, 縁が Al に富む明瞭な累帯構造を示す.
- (d) パンペリー石: 緑泥石中では, 細粒な自形結晶の集合体をなす. 個々の結晶の中心部が Fe に富んでいる.
- (e) パンペリー石: 曹長石中で半自形結晶を示す. 一部融食形を示すが, 中心部は Fe に富んでいる.
- (f) Ca 角閃石の累帯構造: 中心部がアクチノ閃石, 縁が普通角閃石.
- (g) 単斜輝石を置き換えたアクチノ閃石の非対称的な pressure shadow を埋める普通角閃石.
- (h) アクチノ閃石の pull-apart 部を埋める普通角閃石.

記号 E: 緑簾石, P: パンペリー石, R: ブドウ石, A: アクチノ閃石, H: 普通角閃石, ab: 曹長石, ch: 緑泥石, pl: 斜長石.