

葉片状岩の変形様式—宇奈月帯の流紋岩片岩からの情報

梅村 隼夫¹⁾ · 原 郁夫²⁾

(¹⁾高知大学理学部地質学教室, ²⁾広島大学名誉教授)

Deformation style of foliated rocks—an information from rhyolite schist of the Unazuki Zone, central Japan

Hayao UMEMURA¹⁾ and Ikuo HARA²⁾

¹⁾Department of Geology, Faculty of Science, Kochi University, Kochi, 780,

²⁾Professor Emeritus, Hiroshima University

Abstract: Rhyolitic rock in the Unazuki Zone of the Hida mountains, central Japan, exhibits a sequence of changes from the development of schistosity under lower-temperature metamorphic conditions to the formation of well-developed compositional banding (foliation) under higher-temperature metamorphic conditions. The schistosity and compositional banding are quite planar as observed on outcrops along the Kurobe River. The compositional banding is shown by the alternation of Q-layer consisting mainly of quartz, F-layer consisting mainly of feldspar (K-feldspar and/or plagioclase), FQ-layer consisting of quartz and feldspar and M-layer consisting of mica.

Q-layers are divided into two types, CQ-layers consisting of coarse-grained quartz, which shows type II crossed girdle of c-axis fabric, and S-CQ-layers consisting of fine-grained quartz, which shows Type II S-C structure and type I crossed girdle of c-axis fabric. Such microtextures of quartz indicate that layer-parallel shearing under lower-temperature condition than ca.450°C during the retrograde phase of metamorphism occurred strongly in some Q-layers, forming Type II S-C structure and type I crossed girdle, but not in some others (Umemura & Hara,1996). Grain size of quartz in a Q-layer changes depending upon $a=(Q/(Wf1+Wf2+Q))$ value, where Q is width of the Q-layer and Wf1 and Wf2 are widths of its just surrounding F-layers. Grain size of quartz seams appears, therefore, to depend on magnitude of stress concentration in Q-layers and is much larger in CQ-layers than in S-CQ-layers (Umemura & Hara,1996). Feldspar grains in FQ-layers show frequently arc-like shapes and are much smaller than those in F-layers which show commonly granular shapes. Size reduction and shape change of feldspar grains in FQ-layers are illustrated in terms of strain-controlled dissolution (cf. Bell & Cliff,1989), which was induced by deformation of quartz (Umemura & Hara,1996).

Ab content of Plagioclase in F-layers and FQ-layers shows a clear tendency to be nearly constant within individual layers, having a maximum frequency value, but to change from layer to layer. The maximum frequency values are observed in ca.82%, ca.86% and ca.98%. As plagioclase grains are associated with muscovite flakes in large volume, commonly, the

maximum frequency value of their Ab content is ca.98%. These facts suggest that the rhyolite schist was especially strongly deformed in three phases under descending temperature during the retrograde phase, A phase when plagioclase grains were recrystallized with Ab content of ca.82% (a maximum value between 81.5% and 83.5%) by layer-parallel shear deformation, B phase when they were recrystallized with Ab content of ca.86% (a maximum value between 85.5% and 87.5%) by layer-parallel shear deformation, and C phase when they were recrystallized with Ab content of ca.98% by layer-parallel shear deformation, and that in the rhyolite schist there are F-layers and FQ-layers strongly deformed only during the A phase, those strongly deformed only during the B phase (or through the A-B phase) and those strongly deformed only during the C phase (or through the A-B-C phase or through the B-C phase or during the A and C phases), showing that strain concentration occurred in different layers between the different phases of layer-parallel shear deformation. Crystallization of muscovite flakes is related to injection of H₂O. Modal values of them greatly change from layer to layer, suggesting that the injection of H₂O during the layer-parallel shear deformation of C phase occurred heterogeneously from layer to layer. Analogous heterogeneous deformation of the foliated rocks has also been described in the Sambagawa schists by Hara et al.(1988,1992), showing that such the layer-parallel shear deformation was generally associated with schistosity-parallel fracturing (=formation of quartz veins).

キーワード：宇奈月帯，流紋岩片岩，葉片状岩，葉片状構造（葉理），剪断変形，葉理に沿う不均質変形，葉理に沿うH₂Oの不均質注入

はじめに

葉片状岩は変形岩の1種であり，その組織が，構成鉱物の違いによって規定される微細な層の互層 (compositional banding) によって特徴づけられるものである。これをfoliated rockとするのは，変形によって形成されたcompositional bandingをイギリスではfoliation (葉理=葉片状構造)と呼んでいることによっている (Dennis,1967参照)。変形によって葉片状岩が形成される条件や過程については，最近のJordan (1987,1988) やHandy(1990,1994) などによる優れた研究があるが，ここでの課題は既存の葉片状岩が変形を受ける場合の葉片状構造の変形様式についての一つの情報の記載である。ここで記載される情報は，飛騨山地の宇奈月帯の流紋岩片岩 (Fig.1) の組織解析から与えられたものである。

宇奈月帯の流紋岩片岩は，Ishioka and Suwa (1956) などによってレプタイトとして記載されてきた岩石である。この片岩の受けたピーク変成作用は中圧高温型であり，温度・圧力の増加を反映したI帯からIV帯までの4つの鉱物帯を示すものである (Hiroi,1983)。この片岩は一つの平滑な片理をもつ板状の岩石として発達している。梅村・原 (1996) は，ピーク変成作用の温度が525℃と見積もられたI帯 (Hiroi,1983) の流紋岩片岩には片理は発達するが葉片状構造は形成されていないこと (Fig.2a)，II帯高温部において，この片岩が片理にそって葉片状構造を形成することを示し (Fig.2c & d)，この葉片状構造が，ほとんど長石だけから成る微細な長石層 (F層；

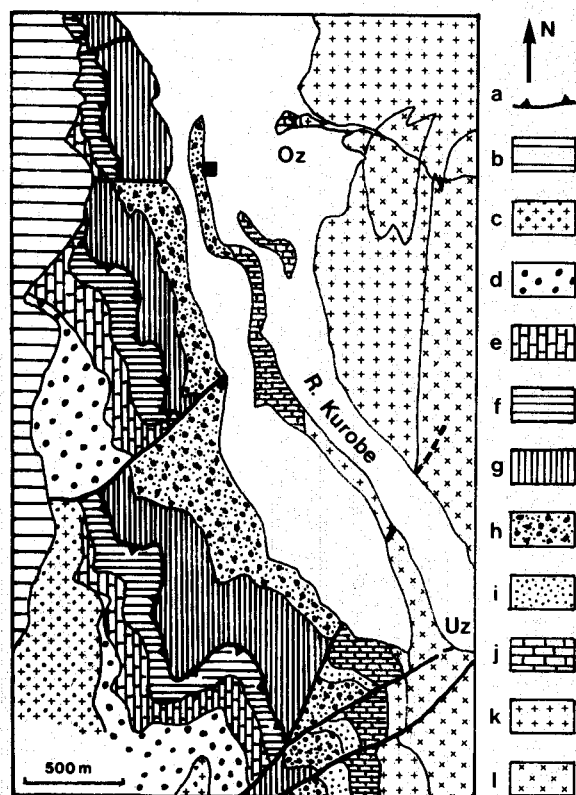


Fig.1. Geological map of the Unazuki Zone of the Hida mountains (after Katoh et al., 1989) and locality of the sample (rhyolite schist) examined in this paper (solid square).

a: thrust, b: Tertiary rocks, c: granodioritic rocks of Jurassic age, d and e: gneisses of the Hida Zone (d: basic gneisses, e: calcareous gneisses), f: mylonites from granitic rocks, g, h, i, and j: schists of the Unazuki Zone (g: alternation of psammitic schists, pelitic schists and basic schists, h: rhyolite schist, i: pelitic schists, j: calcareous schist), k and l: plutonic rocks of Triassic age (k: granitic rock, l: gabbroic rocks), Uz: Unazuki, Oz: Otozawa.

採集された試料 (流紋岩片岩) において, 平滑な葉片状構造を構成する斜長石の化学組成から, 葉片状構造の変形特性を解析し記載する。

Fig.2c, Fig.3a~d), ほとんど石英だけから成る微細な石英層 (Q層; Fig.2c, Fig.3a~c, Fig.4b), 長石と石英から成る微細な層 (F Q層; Fig.3a~d), 黒雲母片から成る微細な層 (M層; Fig.3b) などが互層する構造である (Fig.5) ことを記載し, 各層の微細組織を詳細に解析した。II帯高温部のピーク変成作用の温度を, Hiroi (1983) は約570°C, Wada (1982) は約550°Cと見積もった。梅村・原 (1996) は, 葉片状構造はこのような温度条件での変形作用によって出現したものではあるが, Q層の石英のc軸ファブリックを解析して, このような葉片状構造は, type II crossed girdle (Fig.6a) が形成される条件から, type I crossed girdle (Fig.6b) が形成される450°Cより低温な条件においても平滑な構造を維持しながら変形したことを明らかにした。また, Q層における石英の平均粒径が, このQ層の幅 (Q) とその両側のF層の幅 (W f 1, W f 2) との関係でどのように変化するかを検討 (Fig.7) し, Handy (1990) の資料におけるように, 石英の粒径が $a = Q / (Q + W f 1 + W f 2)$ に依存して変化すること, 即ちQ層における応力集中の大きさを反映して変化することを示した。

ここでは, 音沢駅の南で黒部川にかかる橋の下の露頭 (Fig.1) — Hiroi (1983) によるII帯高温部最下部あたりと推定される位置 — から

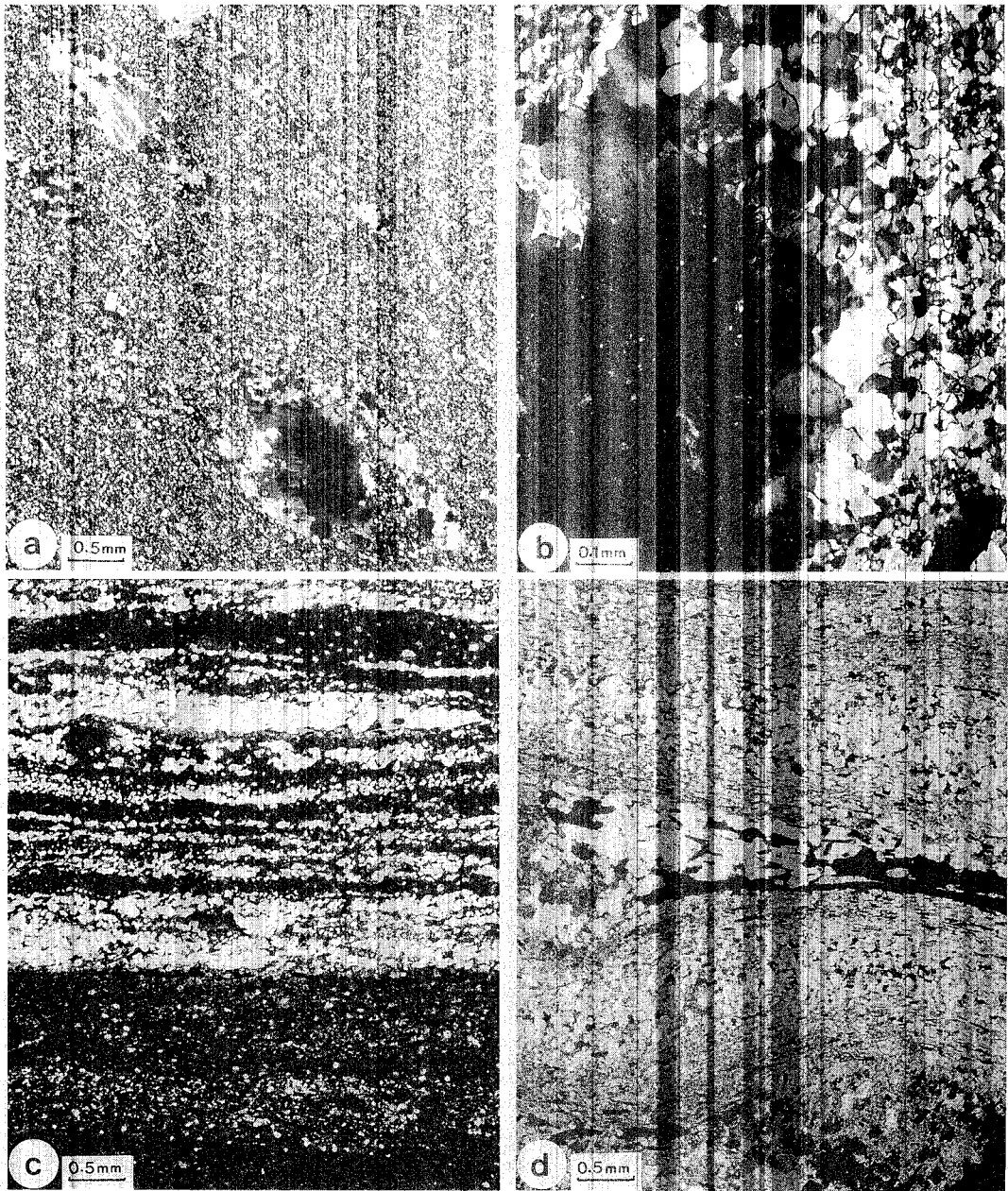


Fig.2. Microphotographs of the rhyolite schist of the Unazuki Zone (after Umemura & Hara, 1996).

a and b: samples from the mineralogical zone I. a shows a distinct schistosity of single set, and b shows a K-feldspar porphyroblast with dynamically recrystallized grains and pressure fringe consisting of fine-grained quartz and K-feldspar. c and d: samples (etched) from the high-temperature part of the mineralogical zone II, showing a distinct compositional banding. White parts consist mainly of quartz, while dark parts mainly of feldspars.

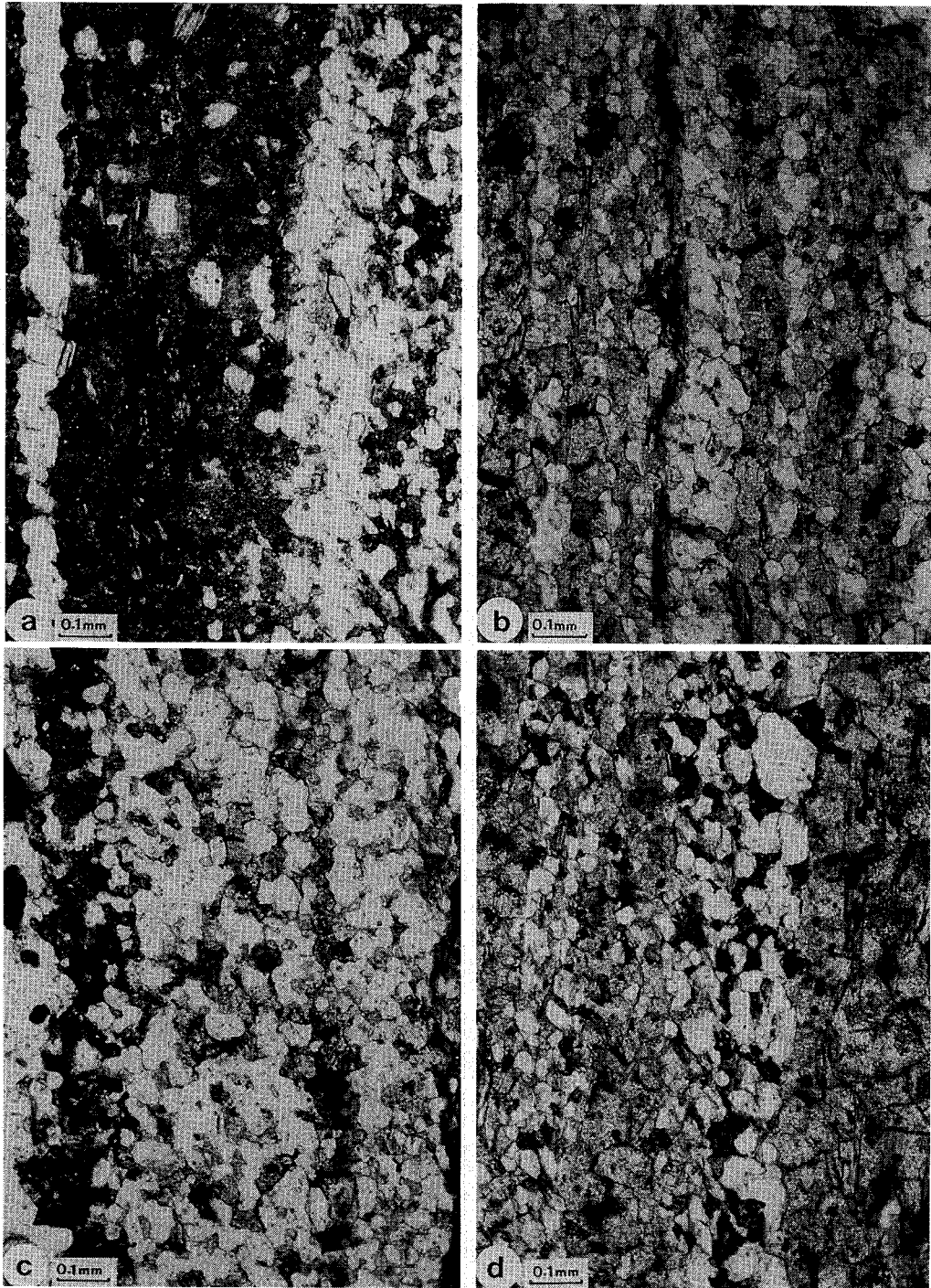


Fig.3. Microphotographs of the rhyolite schist of the Unazuki Zone, showing structures of compositional banding (after Umemura & Hara,1996).

White parts consist of quartz, and dark parts mainly of feldspars. Dark flaky minerals are mica.

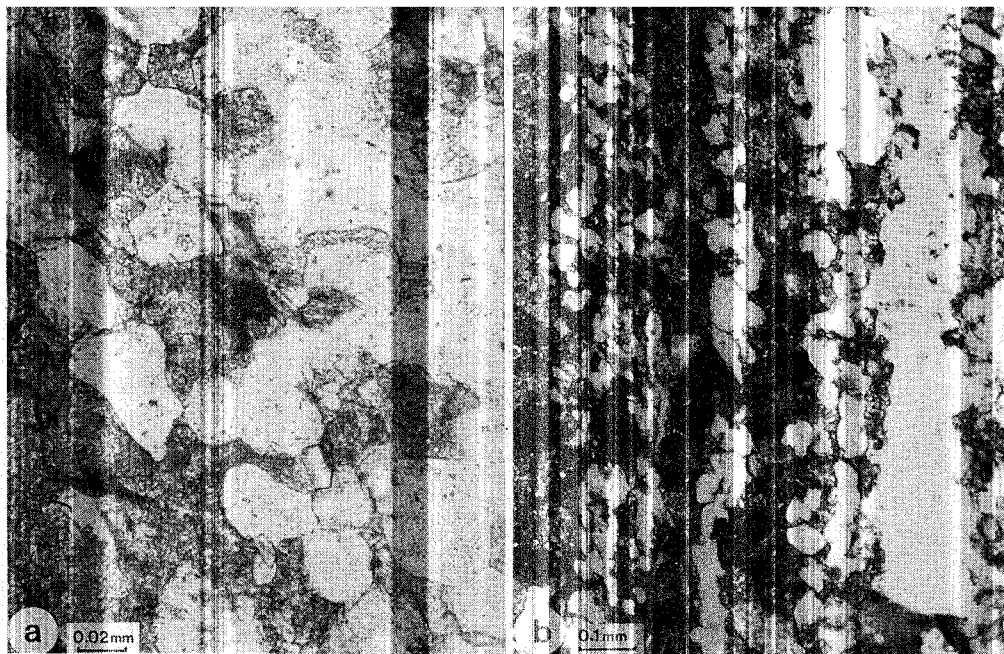


Fig.4. Microphotographs of the rhyolite schist of the Unazuki Zone, showing structures of compositional banding (after Umemura & Hara,1996).

a: arc-like shapes of feldspar grains in FQ-layer. White parts are quartz grains. b: compositional banding shown by alternation of CQ-layer (CL), S-CQ-layer, F-layer and FQ-layer.

斜長石の化学組成からみた葉片状構造の特徴

ここで記載される試料の示す岩石構造は、梅村・原（1996）が記載したII帯高温部からの試料の示す岩石構造と本質的に同じ特徴をもつものである：カリ長石斑晶・斜長石斑晶は、動的再結晶によって細粒化しながら葉片状構造にそって著しく伸長した形態を示し、そのプレッシャー・シャドウの組織は葉片状構造の形成が剪断変形場で起こったことを示唆する特徴をもつものである。葉片状構造を構成するF層には、カリ長石から成るK層と斜長石から成るP層が識別される（Fig.8）。FQ層を構成する長石の主体は斜長石である。P層とFQ層には、斜長石を交代して形成された白雲母が認められるが、その量は層によって大きく変化する（Fig.8）。このような白雲母片は葉片状構造に沿う顕著な定向配列を示している（Fig.8）。

Fig.9はP層とFQ層を構成する斜長石粒の核のAb組成分布を説明するものである。測定はFig.8に示されたような層（La～Lq）において行なわれ、層から層へ斜長石のAb組成分布の変化が検討された。まずFig.8aとFig.9によって簡潔に記載しよう。

層Laと層Lbは石英の少ないFQ層である。両層を構成する斜長石粒の多くは86%あたりのAb値を示す。石英に富むFQ層である層LcにおいてはAb値は80%以上で分散している。層Lcに接する層Ld（P層）においてもAb値の分散は大きい、82%前後のAb値を示す粒が多い。薄い黒雲母層

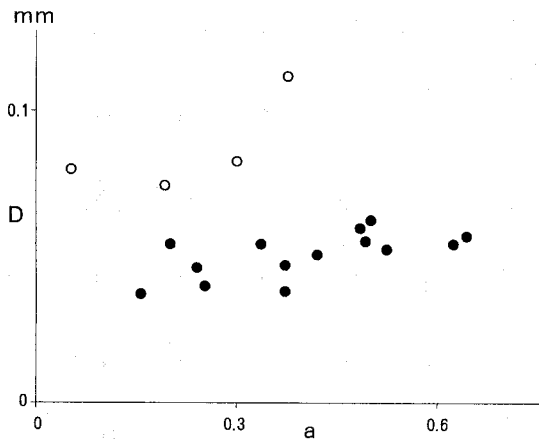


Fig.7. Relationship between size (D) and a value for quartz grains in Q-layers (after Umemura & Hara, 1996).

open circles: data from CQ-layers, solid circles: data from S-CQ-layers. For fuller explanation see the Text (abstract).

Fig.8bは同じ薄片内のFig.8aの位置から3 mmほど離れた位置の顕微鏡写真である。次にFig.8bの資料 (Fig.9) を記載しよう。石英の少ないFQ層である層Lj, 層Lk, 層LiのAb組成分布は, 本質的に同じであり, 86%前後 (85.5%と87.5%の間) に強い集中を示すものである。その下位の層Lmも石英に乏しいFQ層であるが, 層の左上側の部分では交代性白雲母が顕著であり, 層の右下側の部分では交代性白雲母はあまり認められない。Ab組成の分布は両者において明瞭に異なっている: 交代性白雲母に富む領域では98%前後のAb値を示すものが多く, それに乏しい領域では86%前後のAb値を示すものが多い。層Lmの下位の層L2はK層である。その下位の層LNは交代性白雲母に富むP層であり, 98%前後のAb値を示す斜長石が多い。層L3はK層である。その下位の層Lo交代性白雲母に富むP層であり, ここでも他の交代性白雲母

に富む領域と同様に, 98%前後のAb値を示す斜長石が多い。その下位の石英の少ないFQ層である層Lp, 層Lqでは, ごく微細な白雲母片が僅かに認められるにすぎない。ここでは, Ab組成は, とともに86%前後に集中している。

考察

以上に記載された資料から, 流紋岩の基質から出発した葉片状構造を構成する斜長石粒の核のAb組成は, 岩石を通して一定ではなく大きく変化するが, その変化には規則性があり, その特徴を次のように説明することが出来る: 1) 葉片状構造を構成する層の各層内でAb組成は一般にはほぼ一定で特定の値に集中して最頻値を示す, 2) したがってAb組成の変化は一般に層と層の間での最頻値の変化として認められるものである, 3) 最頻値は82%前後, 86%前後, 98%前後のAb組成において認められる, 4) 斜長石を交代して形成された白雲母が多量に認められる層では最頻値は98%前後の位置にある, 5) 交代性白雲母の量が層内部で変化する時, 多量の白雲母を含む領域での最頻値は98%前後の位置にあるのに対して, ごく微細な白雲母を僅かしか含まない領域での最頻値は86%の位置にあるというように, Ab組成の変化が認められる (層Lm), 6) Fig.8の顕微鏡写真において82%前後に最頻値をもつ層と86%前後に最頻値をもつ層の間には, 後者で, 極めて微細な白雲母がやや多く, また斜長石がやや細粒であるという違いがあるように見える。

斜長石斑晶中に動的再結晶によって形成された細粒斜長石の核のAb組成を解析した結果がFig.10に示されている。ほとんどの粒が78%前後のAb組成を示し, 上記の葉片状構造を構成する石基起源の再結晶斜長石粒の核の組成 (Fig.9) とは明瞭に異なっている。したがって, 斜長石のAb組成は組織と対応して明瞭な変化を示すと言うことが出来る。斜長石のAb組成は, 再結晶作用時の温度に依存して変化し, Ab組成の増大は温度の低下を反映するものとすれば, 葉片状構造を

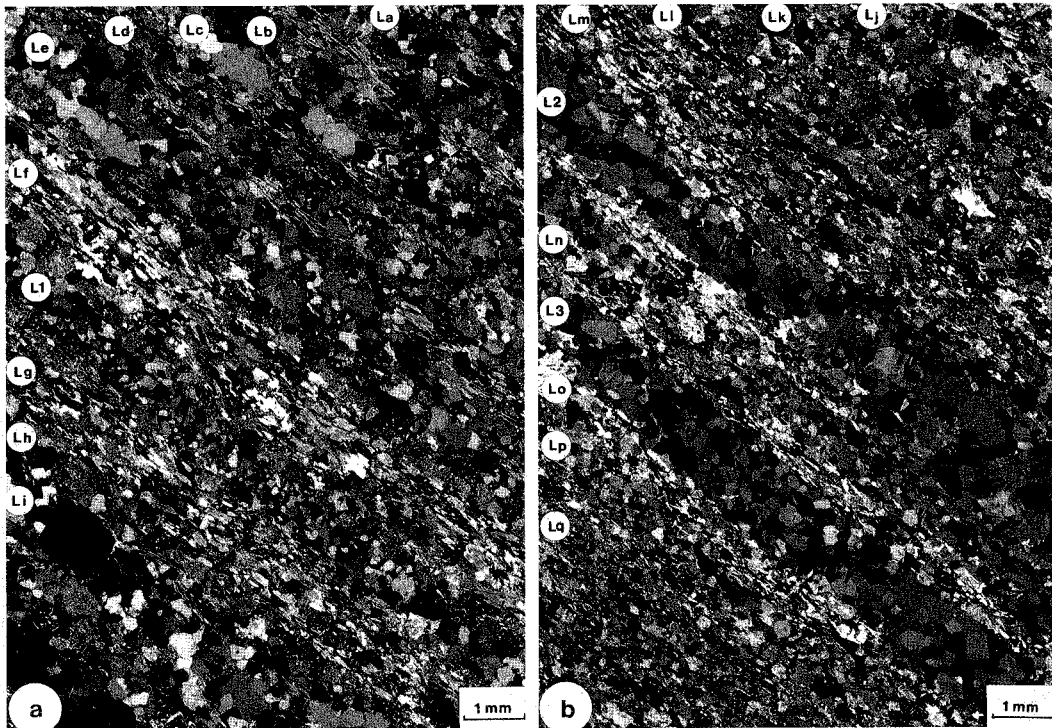


Fig.8. Microphotographs of the rhyolite schist, whose locality is shown in Fig.1, showing a distinct compositional banding.

L1~L3: K-layer consisting of K-feldspar, La~Lq: P-layer consisting mainly of plagioclase and FQ-layer consisting mainly of feldspar and quartz. For fuller explanation see the Text (abstract).

構成する石基起源の斜長石は、後退変成過程における3つの主要な変形時相における再結晶作用を刻印したのと考えられる：A時相=82%前後のAb組成の再結晶斜長石の形成期，B時相=86%前後のAb組成の再結晶斜長石の形成期，C時相=98%前後のAb組成の再結晶斜長石の形成期。そして，Fig.9から，葉片状構造を構成する層には，A時相の組織が強く残存するもの（A型層）と，B時相の組織が強く残存するもの（B型層）と，C時相の組織が強く残存するもの（C型層）とが存在すると思われる。

A型層はB時相の変形作用をほとんど受けなかった層であり，A型層とB型層はC時相の変形作用をほとんど受けなかった層であろう。したがって，変形作用は，すべての変形時相において，葉片状構造を構成するすべての層を通して一様に起こったのではなく，ある時相にはある層は剛体的に挙動し別の層に変形が集中するというように差別的に起こったのと考えられる。斜長石を交代する白雲母は水の供給があった場を示唆する。葉片状構造を構成する層の中で，特定の層だけが，また特定の層の一部だけが，多量に白雲母を含むことは，変形の過程に水の供給が層にそって不均質に起こり，多量な水を供給された位置に変形が集中して，そこに斜長石の再結晶作用と白雲母の結晶作用とその定向配列が出現したことを示すものであろう。

葉片状構造の層による差別的変形は，梅村・原（1996）によっても記載された。先にも要約したように，梅村・原は，流紋岩片岩の石英組織から，葉片状構造に沿う剪断変形特性を次のように解

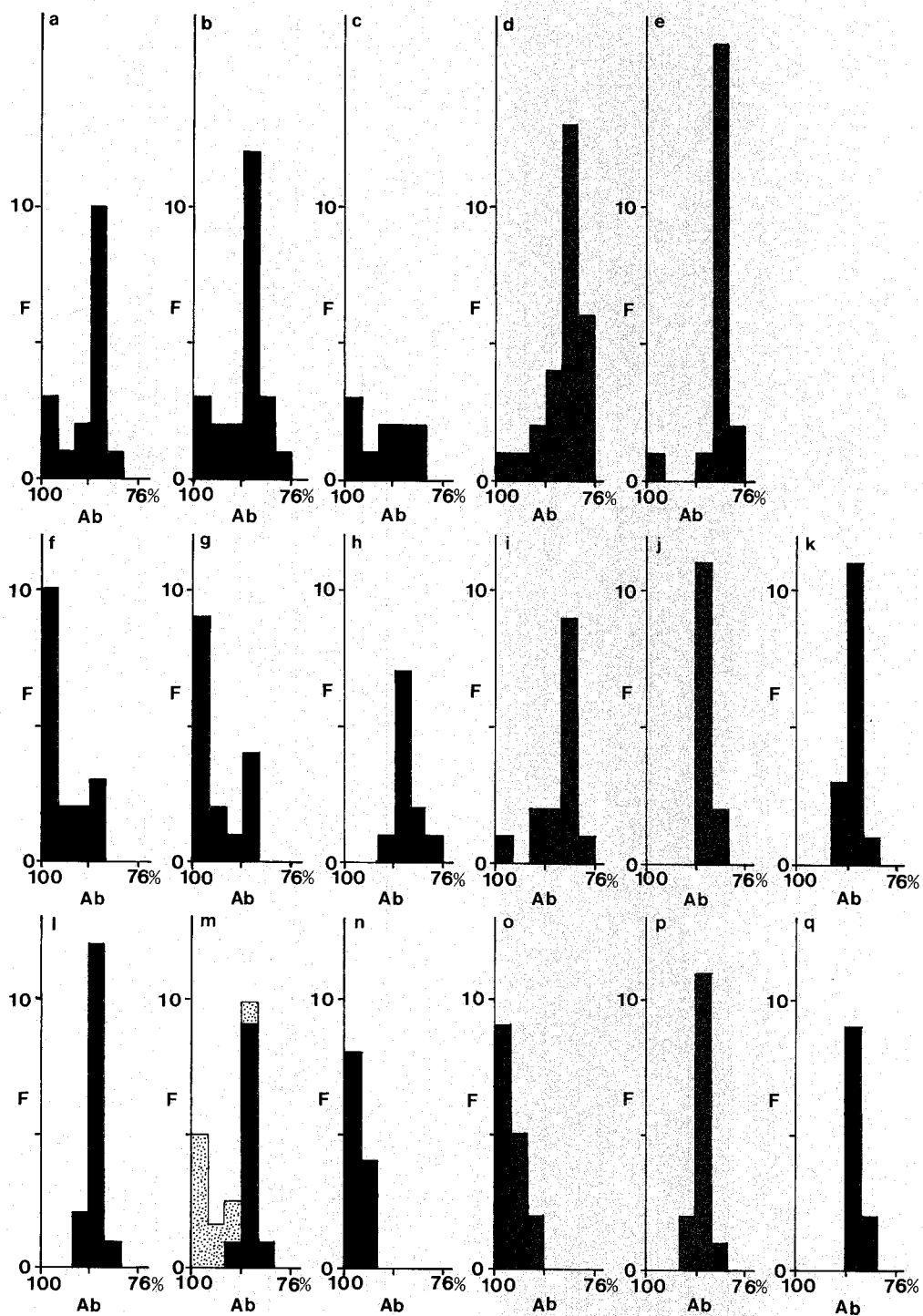


Fig.9. Ab content of plagioclase grains (cores) in layers [La (a) ~ Lq (q)] shown in Fig.8. F: number of grains. In m, stippled part is for data from mica-rich domain of Lm and solid part is for data from mica-poor part of Lm.

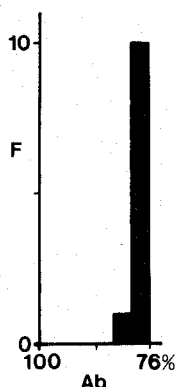


Fig.10. Ab content of fine-grained plagioclase (cores) dynamically recrystallized in plagioclase porphyroclasts of the specimen of Fig.8.

析している。Q層は、それを構成する石英の形態とc軸ファブリックの特徴から、形成時期の異なる2つの型に識別される：type II crossed girdle (Fig.6a) のc軸ファブリックを示し葉理にそって伸長する粗粒石英から構成されるCQ層と、type I crossed girdle (Fig.6b) を示しType II S-C構造 (Lister and Snoke,1984参照) を形成する細粒石英から構成されるS-CQ層であり、後者の形成期 (S-C時相) が前者の形成期 (C時相) より後期である。type II crossed girdleからtype I crossed girdleへのc軸ファブリックの転換は、剪断変形場の温度条件が、変形が進行する中で約450°C (Sakakibara,1995 ; 竹下, 1996参照) 以下へと降下したことを示唆する。したがって、CQ層が残存することから、S-C時相の葉理にそう剪断変形場で、Q層の石英の変形が岩石全体を通して一様であったのではなく差別的であり、あるQ層で石英は剛体的に挙動した (=CQ層の残存) ものと判断される。

以上の解析結果から、葉片状構造の存在は、変形過程を通して変形作用が、葉片状構造を構成するすべての層に必ずしも常に一様に起こったことを示すものではなく、このような岩石においても変形作用は、層に沿って層ごとに差別的に極めて不均質に起こる可能性が示されたと言うことが出来よう。原ほか (1988), Hara et al.(1992) はまた、1つの平滑な層面片理をもつ三波川変成岩は、片理にそう剪断変形作用によって、一様に変形を受けたのではなく不均質に変形され、その過程に常に片理にそう幅の狭い石英脈群の形成を伴うように変形 (schistosity-parallel fracturing) されていることを示している。

謝辞：斜長石の化学組成のEPMA分析は、故南朝生氏 (広島大学理学部地球惑星システム学教室) によって行なわれたものである。長年にわたる私どもの研究への氏の御協力に対して感謝し、ここに本稿を氏の霊前に捧げたいと思う。

文 献

- Dennis,J.G.: International Tectonic Dictionary. Mem.Am.Assoc.Petrolume Geol.,7, (1967).
 Handy,M.R.: The solid-state flow of polymineralic rocks. Jour.Geophys.Res.,95, 8647-8661, (1990).
 Handy,M.R.: Flow laws for rocks containing two-nonlinear viscous phases; a phenomenological approach. Jour.Struc.Geol.,16,287-301,(1994).
 原 郁夫・塩田次男・秀 敬・武田賢治：三波川帯のテクトニクス。月刊地球, 10, 372-377, (1988).
 Hara,I., Shiota,T., Hide,K., Kanai,K., Kaikiri,K., Takeda,K., Hayasaka,Y., Miyamoto,T., Sakurai,Y. and Ohtomo,S.: Tectonic evolution of the Sambagawa schists and its implications in convergent margin processes. Jour.Sci.Hiroshima Univ., Ser.C,9,495-595,(1992).
 Hiroi,Y.: Progressive metamorphism of the Unazuki pelitic schists in the Hida terrane, central

- Japan. Contrib.Min.Petrol.,82,334-350,(1983).
- Ishioka,K. and Suwa,K.: Metasomatic development of staurolite schist from rhyolite in the Kurobegawa area, central Japan: a preliminary report. Jour. Earth Sci.,Nagoya Univ.4,123-140,(1956).
- Jordan,P.G.: The deformational behaviour of bimineralic limestone-halite aggregates. Tectonophysics,135,185-197,(1987).
- Jordan,P.G.: The rheology of polymineralic rocks-an approach. Geol. Rundschau, 77,285-294,(1988).
- Katoh,Y., Hayasaka,Y., Hara,I., Tanaka,S. and Kagami,H.: Deformation style of the Unazuki schists and its implication in the tectonics of the Hida Terrane. DELP Publication,28,19-23,(1989).
- Lister,G.S. and Snoke,A.W.: S-C mylonites. Jour.Struc.Geol.,6,617-638,(1984).
- Sakakibara,N.: Structural evolution of multiple ductile shear zone system in the Ryoke belt, Kinki Province. Jour. Sci. Hiroshima Univ.,Ser.C,10,267-332, (1995).
- 竹下 徹: 天然変形石英岩中のc軸ファブリック転移に基づく変形物理条件の推定. 地質雑, 102, 211-222, (1996).
- 梅村隼夫・原 郁夫: 葉理の構造—宇奈月帯の流紋片岩からの例. 原 郁夫先生記念論文集, 287-295, (1996).
- Wada,H.: Metamorphic temperature determined by carbon isotopic geothermometry for the Hida metamorphic belt, central Japan. Jour.Geol.Soc.Japan, 88, 741-751,(1982).

平成9(1997)年9月30日受理

平成9(1997)年12月25日発行