

石英の低温変形領域における微細構造発達過程

Progressive microstructural development in quartz deformed under low temperature conditions

西川 治*

Osamu Nishikawa*

Abstract: In order to clarify the deformation mechanisms and modes in quartz, detailed observations of microstructures and analyses of crystallographic orientation distribution patterns of naturally deformed quartz under subgreen-greenschist facies conditions have been done. Since the activity of slip systems in quartz is restricted to those on basal plane in low temperature conditions, the deformation behavior of quartz is highly anisotropic. A representative microstructure developed in quartz grains in such conditions is kink band. The usefulness of morphology of kink bands as a indicator of differential stress level and the effect of geometrical strain hardening caused by development of kink bands have been discussed. Dynamic recrystallization mechanisms in the analyzed samples are subgrain rotation and microstructures suggesting the operation of recovery processes are commonly observed in quartz grains. The recrystallized grains have shape-preferred orientation with their long axis orienting perpendicular to the compression stress or bulk shortening axis. Deformation of the quartz at an early stage was dominated by the formation of kink bands. Subsequently, polygonization and subgrain rotation recrystallization occurred overprinting on kink bands. The sequential deformation process is clearly reflected in the transition of the crystallographic orientation distribution from systematic to complicated (or random) rotation patterns.

Key words: quartz, anisotropy, deformation lamellae, kink bands, dynamic recrystallization, strain hardening

はじめに

これまで石英の変形に関する、多くの研究がなされてきた。それは、石英が上-中部地殻を構成する主要な造岩鉱物のなかでも最も流動性に富んでいるため、その流動則が地殻のレオロジーを支配していると考えられてきたことによる。変形した石英結晶中に発達した座屈構造、再結晶組織、転位下部組織などの微細構造や再結晶粒子の結晶方位分布パターンは、変形条件、変形機構、さらには力学的情報を推定するための重要な手がかりになる。石英の変形構造の研究は、これまでマイロナイトや広域変成岩類の運動像など地球表

層部のテクトニクスの解明に非常に大きな貢献をしてきたが、地震の発生機構の解明といった見地から最近活発におこなわれている深部断層岩の研究においてもきわめて重要な役割を果たすと思われる。というのは内陸地震の震源深度（15 km 付近）は石英の塑性変形領域の上部にあたるので（Sibson, 1982），震源領域の物理過程の解明には石英の低温変形の理解が不可欠であるからである。Hirth & Tullis (1992) は、実験で得られた力学的挙動と微細構造の特徴から石英の変形領域を 3 つに区分し、低温領域の変形 (Regime 1) の特徴として、強い力学的異方性と粒内に蓄積された転位歪エネルギーを駆動力にした粒界移動を挙げた。しかしこれまで、天然の石英の変形過程の実態が系統的に明らかにされた例は少なく、低温領域での変形挙動や微細構造発達過程についてまだ十分に理解されていない。

1999年4月6日受付、1999年6月25日受理。

* 東北大大学院理学研究科地質学古生物学教室
Institute of Geology and Paleontology, Graduate School of
Science, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan
e-mail : nisikawa@dges.tohoku.ac.jp

筆者はこれまで、天然試料の変形微細構造の詳細な観察と結晶方位分布パターン解析に基づいた石英の低温変形の研究をおこなってきた。小論では、筆者らの最近の研究成果 (Nishikawa, 1997; Nishikawa & Takeshita, 1999 a, b) を紹介しながら、低温領域（緑色片岩相下部）で石英の結晶内塑性変形がどのように進行するのかをわかりやすく解説する。まず、変形に伴って石英粒内に発達する変形ラメラ、キングバンド、動的再結晶組織などの変形微細構造の特徴をまとめ、石英単結晶が多結晶化するまでの変形初期段階における典型的な微細構造発達過程を明らかにする。また、低温変形における石英多結晶体の力学挙動を変形微細構造から推定する試みを幾つか紹介する。

試料の産状と解析方法

大歪を被った天然の変形岩は、複数の変形ステージを経てきていることが多く、変形微細構造と変形条件との関係は、かならずしも明確ではない。本研究では、母晶が識別できるような比較的低歪の単結晶石英の変形組織に着目することによって、変形を支配している個別の要因の影響を評価するように努めた。使用した試料は、四国山地中央部三波川帯低変成部（大歩危）および秩父北帯（赤良木峠）に発達する2種類（エシェロン型および層平行型）の石英脈である (Fig. 1, 2)。エシェロン型石英脈は赤良木峠と大歩危地域から採取されたもので、母岩の泥質片岩の片理面を高角に切り雁行配列している。三波川帯のD₃時相 (Faure, 1985; 西川ほか, 1994; 肱川時相: 原ほか, 1977; Hara et al., 1992) の褶曲を被っていないこと、石英中の変形構造から推定される占応力方位が石英脈の発達方向から求められたそれと調和したこと (Shiota et al., 1993; 竹下ほか, 1997; Nishikawa & Takeshita, 1999) から判断して、エシェロン型石英脈の変形構造はD₃後の石英脈形成時に発達したものと考えられる。

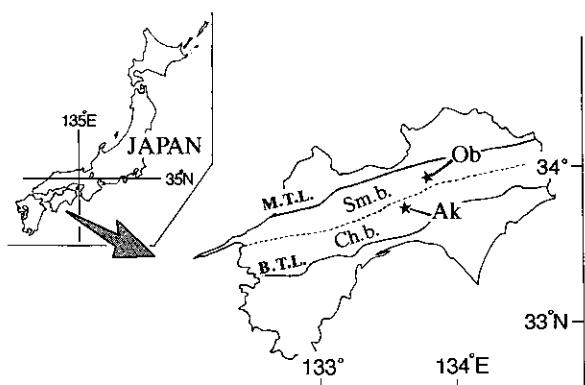


Fig. 1 Map showing sample localities. Ob : Oboke, Ak : Akaragi pass, Sm. b. : Sambagawa belt, Ch. b. : Chichibu belt, M. T. L. : Median Tectonic Line, B. T. L. : Butsuzo Tectonic Line.

層平行型石英脈は大歩危地域から採取された。層面片理に平行に併入し、D₃時相のオープン褶曲をうけており、脈中の石英粒子は弱-中程度に変形している (Fig. 2)。どちらのタイプの石英脈も重複変形の証拠は無く、変形履歴は単純である。また、いずれの試料も母岩の泥質および砂質片岩の変成度が低いこと (パンペリー石-アクチノ閃石相; e.g. Banno & Sakai, 1989; 河戸ほか, 1991), 石英粒子に含まれる流体包有物の均質化温度が150–350°Cの範囲の値を示す (竹下ほか 1997; Seki et al., 1993) ことから、緑色片岩相下部程度の温度条件で変形したと考えられる。2種類の石英脈試料に発達する微細構造の特徴をTable 1に示す。エシェロン型石英脈 (Fig. 2a) に発達する主な変形微細構造は変形ラメラとキングバンドで、再結晶粒子は歪の高い部分を除いて形成されていない。層平行型石英脈 (Fig. 2b) には、キングバンドと動的再結晶組織が発達するが、変形ラメラは稀にしか認められない。

本研究では光学および透過型電子顕微鏡 (TEM: 広島大学理学部設置のJEOL JEM-2000 EX) を用いて、石英中に発達する変形微細構造と結晶方位分布を調べた。従来の結晶方位分布解析の多くは、光学顕微鏡を用いてc軸方位のみを測定していた。しかし、TEMを用いてc軸のみならずa軸方位も決定することによって、格子回転の際の回転軸の方向や回転量などを正確に決定することができ、すべり系や変形モードに関するより多くの情報を得ることが出来る。個々の結晶粒子の完全方位の決定は透過電子顕微鏡 (TEM) の電子線回折パターン、EBSP (Electron Back Scatter Patterns), ECP (Electron Channeling Patterns)など様々な方法を用いて行うことが出来る。EBSPやECPは、海外では90年代に入り地質学の分野にも導入され始め、完全な結晶方位の精密かつ大量のデータ処理を行うことが可能になってきたが、国内の地質系研究施設への導入は遅れている。本研究では、TEMの電子線回折パターンを用いて個々の亜結晶や再結晶粒子のa及びc軸方位を決定した。

低温変形領域の微細構造の特徴

変形ラメラ

変形ラメラは1度以下のわずかな方位差を伴う細長い形状のサブグレインであるが (White, 1973), 光学顕微鏡下では細密な面構造の配列として認識される (Fig. 2b)。変形ラメラの形成機構については、交差した変形帶上の転位が回復によって再配列したものというモデルが提出されている (Christie et al., 1968; Drury, 1993) がまだ不明な点が多い。変形ラメラは変形時の応力方位や大きさの指標として非常に有用である。Avé Lallement & Carter (1971) は変形ラメラを

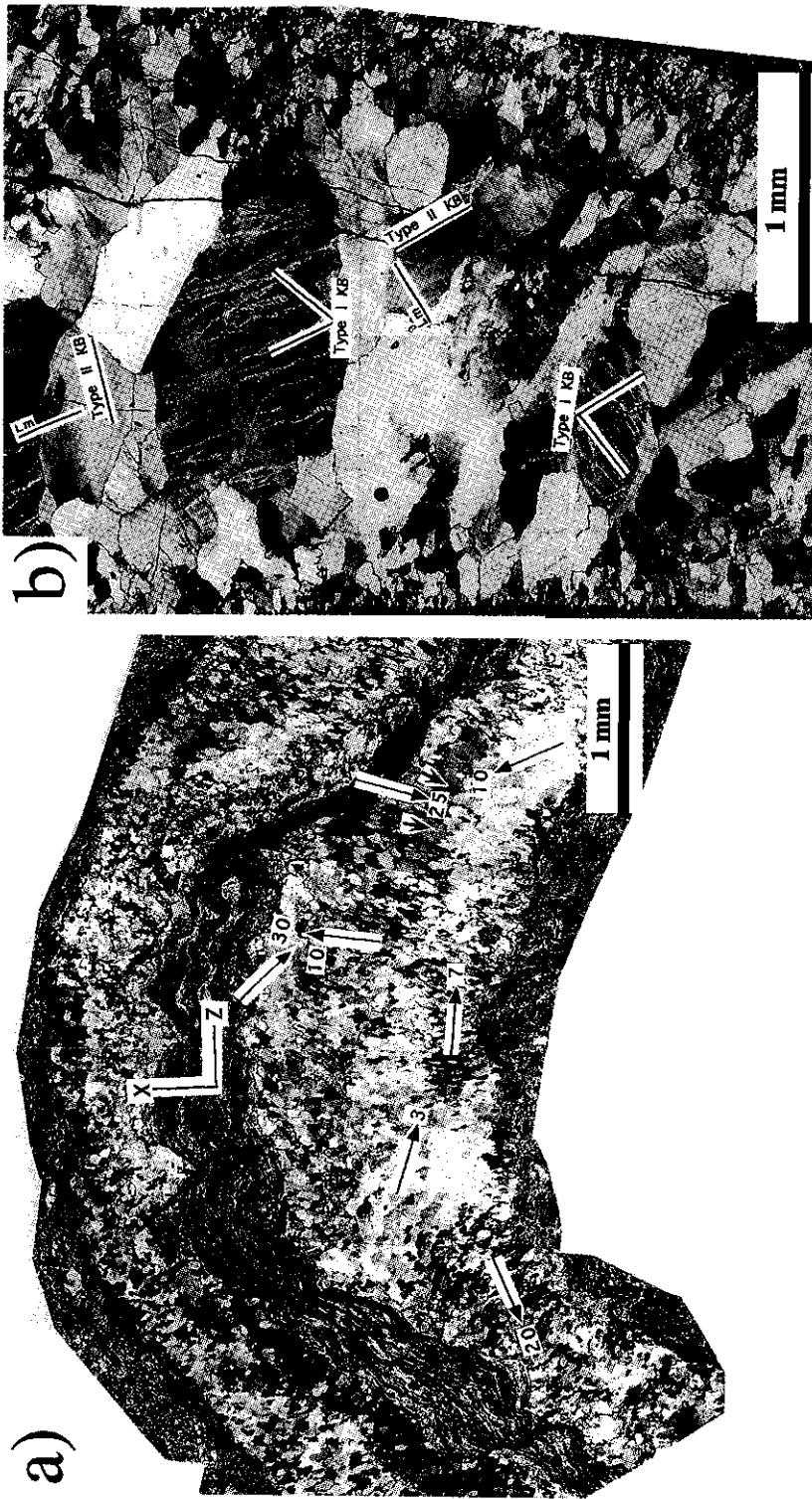


Fig. 2 Optical micrographs of the studied quartz veins. a) Layer parallel vein which is folded and recrystallized by the D_3 phase deformation. Arrows with numbers indicate general trends and plunges of c-axis orientation of each domain. X and Z denote the orientations of the finite elongation and shortening axes, respectively. b) En echelon vein (after Fig. 2 of Nishikawa and Takeshita, 1999 a). Two types of kink bands (indicated by type IKB and type IIB) and deformation lamellae (indicated by Lm) are developed in the quartz grains.

Table 1 The features of quartz in layer parallel vein and en échelon vein samples.

| Sample | Layer parallel type | En échelon type |
|---|--|---|
| Locality | Oboke (Sambagawa belt) | Oboke (Sambagawa belt) Akaragi pass (Chichibu belt) |
| Style | Parallel to schistosity Folded into an open style | Cutting schistosity |
| Width | 2-4 mm | 2-4 mm |
| Deformation phase | D_3 phase | post- D_3 phase |
| Homogenization temp. of fluid inclusions | 190-290°C | 150-350 °C |
| Subbasal deformation lamellae | Scarcely observed | Well developed |
| Kink bands | Developed | Developed |
| Recrystallization, grain size | Occur, $45 \pm 16 \mu\text{m}$ | Only occur in type I kink bands, $1.3 \pm 0.7 \mu\text{m}$ |
| Subgrain size | $9.4 \pm 6.5 \mu\text{m}$ | $1.6 \pm 0.8 \mu\text{m}$ |
| Dislocation density | $(2.7 \pm 1.1) \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ | $(1.6 \pm 0.5) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ |

系統的な変形実験によって研究し、ラメラの発達方向が主要な活動すべり面と密接な関係を持つことを見出した。本研究のエシェロン型の石英脈には、ラメラが basal (0001) 面に対して 30-40° 斜交する sub-basal I 型変形ラメラに対比されるものが卓越するので (Nishikawa & Takeshita, 1999), 主要な活動すべり系は basal 面すべりであったと考えられる。ラメラ極の方位は、 c 軸方位に対してより最小主応力軸側に向く傾向があることが経験的に知られている。従って、複数の粒子の c 軸とラメラ極の方位セットをステレオネット上にプロットし、部分大円で結んでやることによって変形時の主応力方向を推定することができる (矢印法; Carter & Friedman, 1965; Carter & Rleigh, 1969; Takeshita, 1995 など)。Fig. 3 a には、矢印法によるエシェロン型石英脈の応力方位解析の一例が示されている (Nishikawa & Takeshita, 1999 a)。部分大円に沿って c 軸からラメラ極に向かって描いた矢印が集まる方向 (石英脈の壁面に垂直な方向) に σ_3 (最小主応力軸) が推定される。一方、矢印は脈壁に平行な方向から発散しており、この方向に σ_1 (最大主応力軸) が推定される。また、ステレオネット上の矢印の密度分布から、変形ラメラが発達し易いのは、 c 軸方位が主応力軸に対して斜交している (basal 面すべりに都合よく向いた) 粒子であることがわかる。Drury (1993) は、石英の変形実験で sub-basal I 型変形ラメラが、100-200 MPa 以上の高い応力でのみ形成されていることや、合金の変形実験でも exponential creep や冷間加工領域で変形ラメラに類似した構造が見出されることから、sub-basal I 型変形ラメラが高応力変形の指標となりうることを指摘している。

キンクバンド

1. 天然試料の解析

キンク褶曲は、差応力下におかれた有限のすべり強度をもつ層状物質が局所的な回転を伴いながら層間のずれをおこすことによって形成される。格子面間の剪断強度の異方性が強いとき、石英結晶も層状物質のようにふるまい、キンク褶曲する。

低温領域における石英の変形形態は活動すべり面と主応力軸との方位関係に強く支配されている。圧縮軸と basal 面とのなす角 θ が 0-30° の低角度の粒子には、キンク境界が c 軸方位と斜交した 2 方向に発達する共役型 (I 型) のキンクバンドが形成される (Fig. 3 b, 4 a)。I 型キンクバンドは幅が非常に狭く境界部で鋭く屈曲する形態的特徴を示す。 $\theta=30-70^\circ$ の粒子には、キンク境界の極の方位が常に c 軸とほぼ直交した単斜型 (II 型) のキンクバンドが形成されている (Fig. 3b, 4 b)。II 型キンクバンドは、I 型キンクバンドに比べると緩やかに曲げられ、幅広いバンドをもつ。エシェロン型石英脈試料の場合、II 型キンクバンドの幅は、I 型キンクバンドに比べて約一桁大きい (Table 2)。エシェロン型試料中の $\theta=30-70^\circ$ の粒子には、sub-basal I 型変形ラメラが発達していることが多いが、ラメラは常に II 型キンクバンドによって曲げられている。 $\theta=70-90^\circ$ の粒子は、あたかも空き缶を縦に潰したときのように不規則な座屈形態を呈するが (Fig. 4 c), 企が比較的小さい試料ではほとんど変形していないまま残っていることが多い。粒子の剛体回転が拘束されている状態で II 型キンクバンドが形成されるとき、バンド内の c 軸方位 (c_2) は、未変形部分の c 軸

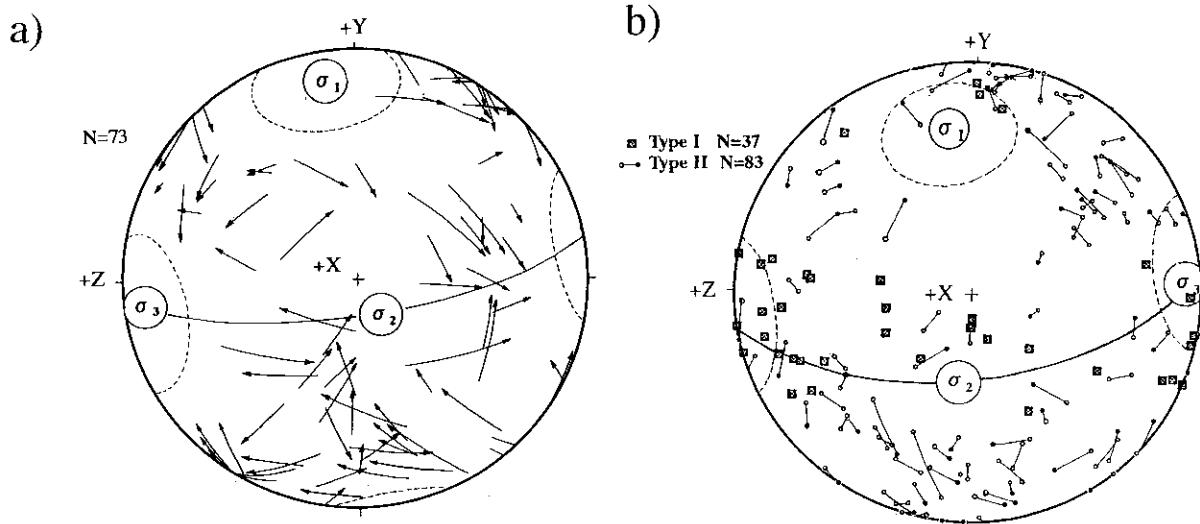


Fig. 3 a) Equal-area lower-hemisphere projections of the partial great circles (arrows) connecting poles to deformation lamellae (points of arrows) and c -axes (ends of arrows) in grains containing lamellae for a sample of the en echelon vein (sample AK after Nishikawa & Takeshita, 1999 a). Inferred directions of σ_1 , σ_2 - and σ_3 -axes and σ_2 - σ_3 plane are shown by solid circles and line, respectively. Dashed lines denote 20° small circles around the inferred σ_1 - and σ_3 -axes, respectively. X is in the vein strike direction, Y in the dip direction, and Z in the direction normal to the vein in right handed coordinates. The northward, downdip and upward directions of X , Y and Z are respectively defined as the positive (+) directions. b) Equal-area lower-hemisphere projections of the partial great circles connecting c -axis orientations of kinked portion (c_2 : solid circle) and unkinked portion (c_1 : open circle) in quartz grains with type II kink bands for sample Ak after Nishikawa & Takeshita (1999 a). Both the orientations of c_1 and c_2 axes are shown by open circles when the kinked portion is not distinguished from the unkinked portion. c -axis orientations of grains with type I kink bands are also shown by shaded squares.

方位 (c_1) に対してより σ_1 軸に近づくように回転しやすい。この傾向を利用し、矢印法と同様な方法で c_1 と c_2 の方位セットをステレオネット上にプロットすることによって、変形時の主応力方位が決定できる (c_1 - c_2 法; Carter & Friedman, 1965; Carter & Raleigh, 1969; Nishikawa & Takeshita, 1999 a)。Fig. 3 b) に示すように、 c_1 - c_2 法で求めた応力配置は、矢印法を用いて決定したもの (Fig. 3 a) と調和的である。

座屈した結晶粒子内の各場所の結晶方位を測定しステレオネット上にプロットしてやると、その分布は、あるひとつの軸のまわりの回転パターンを示すことが多い。転位すべりに伴い格子面が回転するとき、すべり面の法線 (n)、バーガーズベクトル (b) と回転軸 (R) の三者の方向は互いに直交することが知られている (Nicolas & Poirier, 1976; Trépié, et al., 1980 など) (Fig. 5 a)。二者の直交関係が保たれていると仮定すると、結晶方位の回転パターンから活動すべり系を推定することが出来る (Lloyd & Freeman, 1991, 1994; Fliervoet & White, 1995; Lloyd, et al., 1997)。Table 3 には、石英の結晶方位の回転パターンと推定される活動すべり系の関係を示す。Fig. 6 a) は、I型キンクバンドが発達する粒子の結晶方位分布パターンで、回転軸は [m] の方向にあり (Fig. 5 b), c 軸と a 軸のうちの一つは大円に乗り、残る 2 つの a 軸は 30° の小円に乗って回転している。このパターンは basal < a > の単一すべりを示唆している (Table 3)。

2. キンクバンドの形態と変形応力に関する数値モデル

前章では、低温領域の石英は活動できるすべり系が basal 面に限定されるため、力学的異方性がきわめて強いことを微細組織のデータから示した。この章では、 σ_1 軸に対するすべり面 (basal 面) の方位関係に依存した変形応力レベルと座屈形態の変化パターンを、Honea & Johnson (1976) の数値モデルを拡張して検討する。

Honea & Johnson (1976) では、層状に積み重ねられた弾性物質が、層平行に圧縮応力を受けてキンキンを起こす臨界状態にあるとき、層の微小要素にはたらく力のモーメントが平衡状態にあるとして、キンクバンド形成時の応力レベルやバンドの幅を検討している (Fig. 7 a)。Nishikawa & Takeshita (1999) では、このモデルを層斜め圧縮条件に拡張して (Fig. 7 b)，キンクバンド形成に必要な変形応力レベル σ を以下のように求めた。

$$\sigma/\sigma_0 = 1 / [\cos^2 \theta + \sin \theta \cos \theta / (dv/dx)_0] \quad (1)$$

ここで、 θ : すべり面と圧縮軸のなす角度、 σ_0 : $\theta=0$ のときの軸応力、 $(dv/dx)_0$: 層の初期勾配である。

一方 Honea & Johnson (1976) によると、キンクバンドの最大幅 L_0 は、層間の剪断強度 τ_0 、層の初期勾配 $(dv/dx)_0$ 、層面積 tb および曲げ剛性率 BI によって次のようにあらわせる。

$$L_0 = 2\pi ((dv/dx)_0 BI / \tau_0 tb)^{1/2} \quad (2)$$

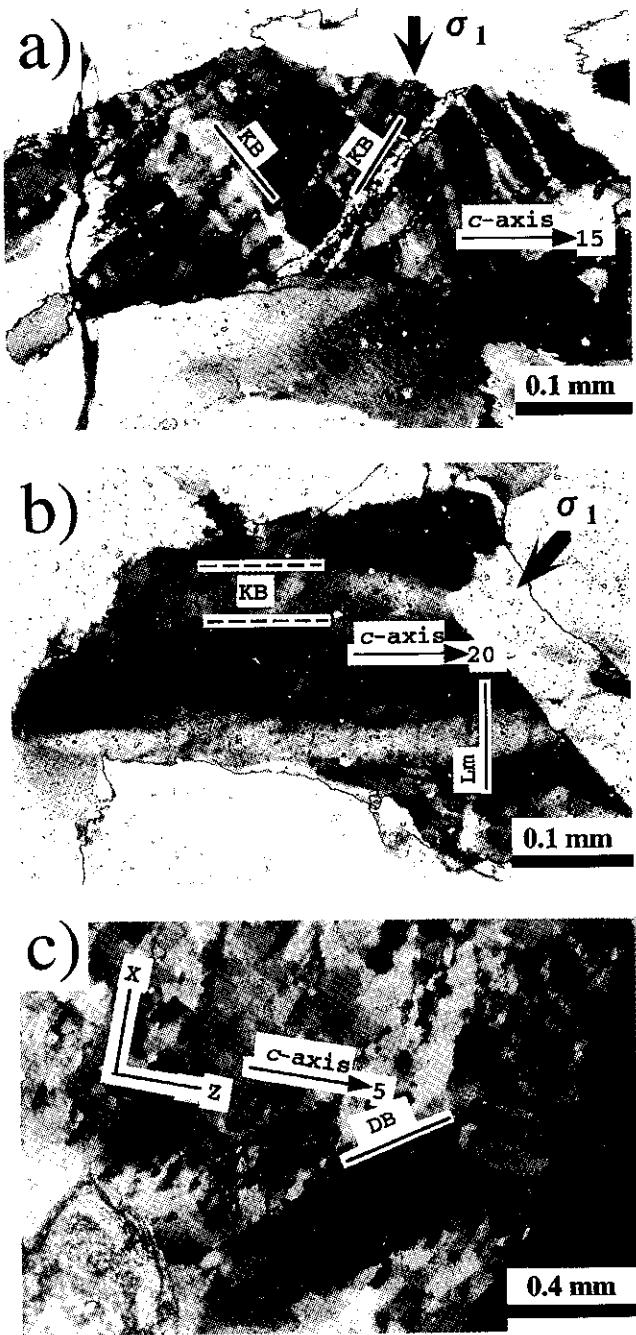


Fig. 4 Optical micrographs showing buckling microstructures developed in the quartz veins. a) Type I kink bands in a grain compressed parallel to basal (0001) plane. b) Type II kink bands and sub-basal deformation lamellae in a grain compressed oblique to basal (0001) plane. c) A grain compressed perpendicular to basal (0001) plane. The azimuth and plunge of c-axis orientation in each host grain is shown by arrows with numbers. KB: kink bands, Lm: deformation lamellae, DB: domain boundary. After Nishikawa & Takeshita (1999 b).

式(2)は、剪断強度が大きくなればなるほどバンドの幅は狭くなることを示している。これは、すべり面とこれに垂直な面にそれぞれ分解される剪断力によるモーメントが釣り合いを保つためには、層間の剪断強度が小さい場合はより広い面積が必要になると理解できよう (Fig. 7c). Nishikawa & Takeshita (1999 a) では、斜交角 θ の大きさが、キンクバンドの幅 L_θ にあたえる影響を以下の式によって検討した。

$$L_\theta/L_0 = [1 + \tan\theta / (dv/dx)_0]^{1/2} \quad (3)$$

Fig. 8 に、式(1)および(3)を用いて $(dv/dx)_0 = 0.002 \sim 0.1$ の場合について求めた軸応力レベル (上図) とバンド幅の変化曲線 (下図) を示す。 $\theta = 0 \sim 10^\circ$ 以内の範囲で軸応力の急激な低下にともないバンド幅も急激に広くなることがわかる。この傾向は、試料中に発達する石英のキンクバンドが θ の変化に伴って幅の狭い共役型から幅広い単斜型へ急激に変化する原因をよく説明している。

動的再結晶組織

造岩鉱物の結晶内変形は、粒内に蓄積された転位歪エネルギーを解消する過程 (回復過程・動的再結晶過程) にも支配されている。歪エネルギー解消過程が十分はたらかないと、増殖した転位の相互作用によって結晶は変形とともに次第に硬くなっていく (歪硬化) (Nicolas & Poirier, 1976 など)。回復は、原子拡散が十分速い時に効果的にはたらき、転位が再配列して転位壁をつくることにより歪エネルギーレベルを下げ、母晶内部に互いに方位差をもつ多数の亜結晶粒子を形成する (ポリゴン化)。動的再結晶には、亜結晶粒子回転と粒界移動という 2 つの代表的な核生成機構がある (Poirier, 1985 など)。前者は、亜結晶粒界に転位が吸収されることにより次第に方位差が大きくなり、高角粒界化して再結晶粒子が生じる機構である。一方、後者の機構では隣接粒子間に転位歪エネルギー差があるとき転位密度の低い再結晶核が隣接した高歪粒子を消費しながら成長する。亜結晶粒子回転過程では、転位密度の大きな変化は伴われないため一般に流动応力は安定しているが (Hirth & Tullis, 1992)，粒界移動の場合、再結晶粒子の成長は転位密度の著しい低下を伴うので再結晶に伴って急激な軟化現象が観測されている (Sakai & Jonas, 1984; Hirth & Tullis, 1992)。

層平行石英脈には再結晶組織がよく発達しており、それはしばしばキンクバンドなどの既存の構造に重複している (Fig. 9)。母晶の結晶方位にも依存するが、一般に歪の大きい部分ほど隣接再結晶粒子間の方位差は大きくなる傾向がある。Fig. 2a の場合、褶曲軸部での平均方位差は 25° 以上に達するのに対し翼部では 15° 未満である。Fig. 10 には、層平行型試料中の歪量の異なる 3 つの母晶に発達した再結晶粒子および亜結

Table 2 Summary of morphological and structural features of two types of kink bands in en échelon vein samples.

| Kink bands type | Type I | Type II |
|--------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Morphological features | Conjugate, angular hinge | Monoclinal, curved hinge |
| Width of kink band | Narrow, 1.5-10 μm | Wide, 10-80 μm |
| Rotation angle | 5-20° (30° <) | 3-8° (>12°) |
| Pole to k.b.b. \wedge c-axis | Oblique | Orthogonal, 90-85° |
| $\sigma_1 \wedge$ basal plane | Mostly 0-30° | Intermediate-low angle, mostly 10-70° |
| Slip plane | Basal plane | Basal plane |

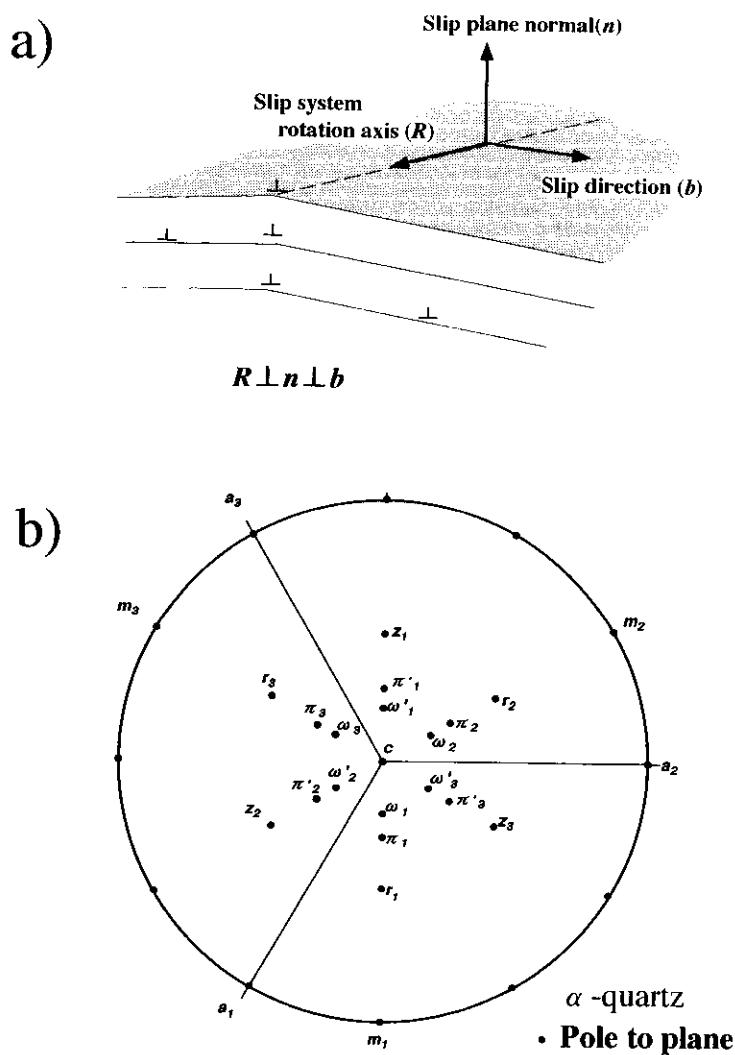


Fig. 5 a) A schematic diagram showing the geometrical relationship that slip plane normal (n), Burgers vector (b) and rotation axis of lattice misorientation (R) are mutually perpendicular. b) Stereographic and lower hemisphere projections of poles to representative crystal planes in α -quartz.

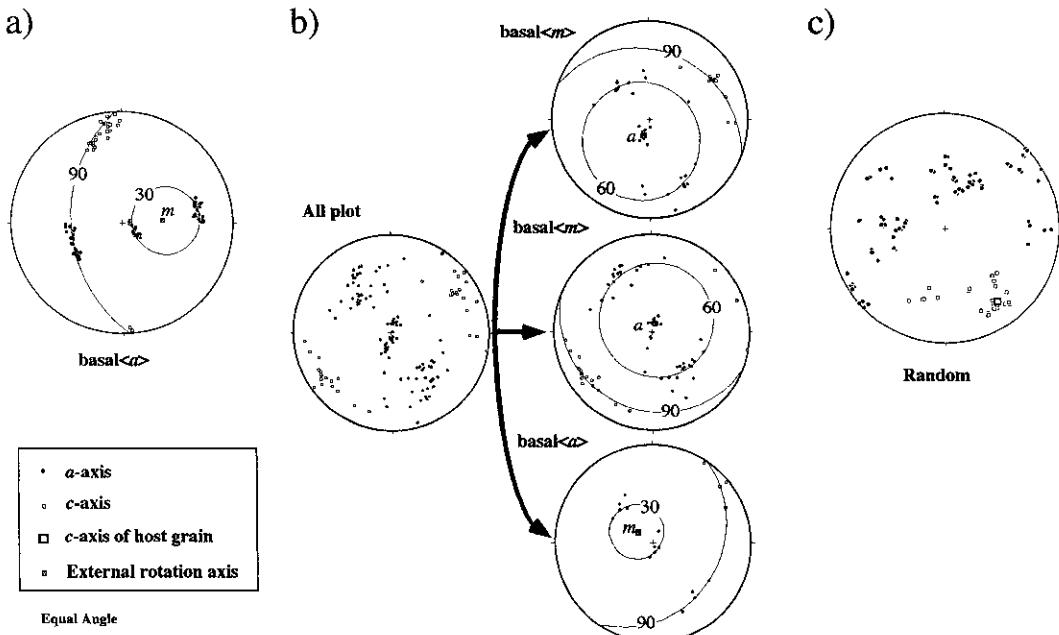


Fig. 6 Stereographic and lower hemisphere projections of crystallographic orientations of subgrains and recrystallized grains in each host grain. a) Sample showing a single systematic rotation pattern. The best fit great and small circles around the rotation axis are also shown by solid lines. Numbers indicate angular distances of each small and great circles from the rotation axis. b) Sample showing composite patterns which can be resolved into at least 3 rotation patterns. c) Sample showing complicated or random orientation distribution.

Table 3 Predicted rotation patterns of crystallographic orientations due to subgrain rotation associated with each slip system (after Nishikawa & Takashita, 1999 b).

| Slip System | Pole | | |
|------------------------------|------|----------|----------|
| | c | m | a |
| basal (0001) <a> | 90° | 0°, 60° | 30°, 90° |
| basal (0001) <m> | 90° | 30°, 90° | 0°, 60° |
| $\omega \{10\bar{1}3\}$ <a> | 67° | 62°, 23° | 37°, 90° |
| $\omega' \{01\bar{1}3\}$ <a> | 67° | 62°, 23° | 37°, 90° |
| $\pi \{10\bar{1}2\}$ <a> | 58° | 32°, 65° | 43°, 90° |
| $\pi' \{01\bar{1}2\}$ <a> | 58° | 32°, 65° | 43°, 90° |
| rhomb r {10\bar{1}1} <a> | 38° | 52°, 72° | 58°, 90° |
| rhomb z {01\bar{1}1} <a> | 38° | 52°, 72° | 58°, 90° |
| prism {10\bar{1}0} <a> | 0° | 90° | 90° |

Each pole is rotated along either a great or a small circle about a common axis denoted by 0°. Angular distance of each pole from the rotation axis is shown by degrees.

$$\langle a \rangle = \langle 11\bar{2}0 \rangle \quad \langle m \rangle = \langle 10\bar{1}0 \rangle$$

晶粒子のアスペクト比と粒径の変化を隣接粒子とのc軸方位差に対してプロットしている。いずれの母晶においても再結晶粒子の粒径は約 $60\mu\text{m}$ 、アスペクト比は約 2.5 と方位差に無関係にほぼ一定している。以上のことから、層平行型試料の母晶全体の歪は粒界（亜

結晶および再結晶粒界）で方位差を生じることによって主に賄われており、動的再結晶核生成機構は、粒成長よりも亜結晶粒子回転が支配的であったと判断される。またポリゴン化の際に形成された初生的粒径と形態は再結晶過程を通してほぼ保たれていたと考えられる。

ここで注目すべき事実は、キンクバンドの発達方向が活動すべり面に完全に支配されているのに対して、試料の亜結晶粒子や再結晶粒子はその長軸が常に有限歪みの短縮軸 (Z) あるいは σ_1 軸に垂直に向くような形態ファブリックを示し、結晶方位（活動すべり面の向き）や既存の変形構造（キンクバンド）の発達方向には全く影響されていないことである (Fig. 9)。このことは、回転的再結晶過程では、転位のすべりが本質的な座屈過程とは全く異なり、転位の運動がすべり面に拘束されない上昇機構が重要であることを示唆する。再結晶粒子の形態ファブリックが有限歪軸あるいは応力方位に依存する理由は明らかではない。しかし、再結晶粒子の内部に変形微細構造が見えないことや母晶の歪量が異なっていても再結晶粒子の平均アスペクト比はほぼ一定 (Fig. 10) という事実から判断して、粒子形態は歪橿円そのものでもありえない。

Fig. 6 b に示される結晶方位分布は、キンク構造に重複して一部再結晶化が進行している試料に見出された。再結晶していない試料 (Fig. 6 a) に比べると結晶方位のばらつきは大きい。この試料では結晶方位が異

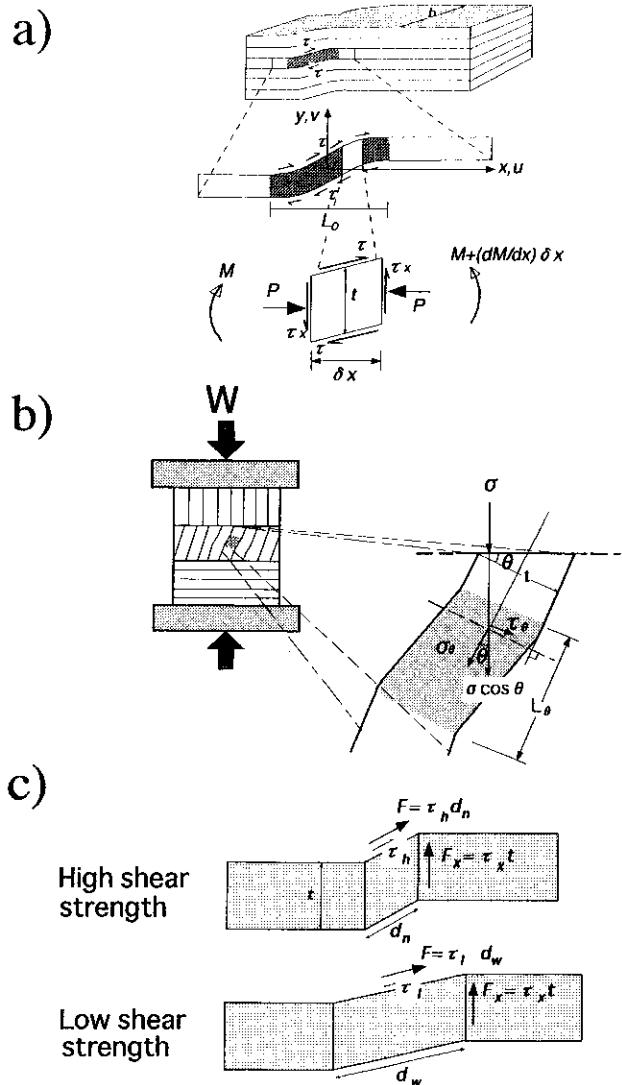


Fig. 7 A schematic diagram showing kinking of elastic multilayers after Nishikawa & Takeshita (1999 a). (a) Moment equilibrium of a small element of elastic multilayers with shear strength τ subjecting layer parallel load P (modified after Fig. 7 of Honea and Johnson, 1976). M : the induced bending moment, P : the axial load, v : the displacement in the y direction, τ : the shear strength between layers, τ_x : the shear stress which operates on the plane perpendicular to the layer, and t and b : the thickness and width of the layer, respectively. (b) Stresses acting on a small element of elastic multilayer in the case that the axis of load W is inclined at θ to the layer. (c) The balance of moment exerted by the shear forces on the anisotropic layer (F) and on the layer perpendicular it (F_x), respectively. The upper and lower figures are for the cases of a high (τ_h) and low (τ_l) shear strength between layers, respectively. Unit length is assumed for the width of layer.

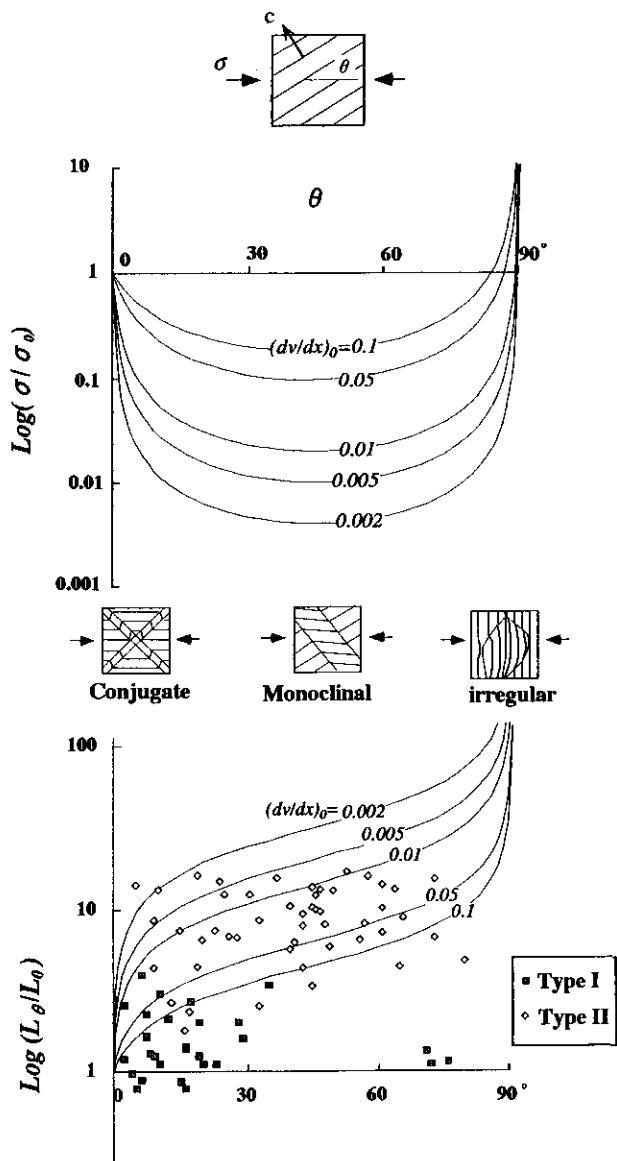


Fig. 8 Theoretically predicted changing patterns of mechanical and structural features of kink bands in relation with inclination angle θ (basal plane $\wedge\sigma$) (modified after Nishikawa & Takeshita, 1999 a). (a) Relation between the inclination angle θ and ratio of the axial stress necessary for kinking σ/σ_0 for initial slope $(dv/dx)_0$ ranging between 0.02-0.1. (b) Relation between the inclination angle θ and ratio of the maximum width of kink bands L_θ/L_0 for initial slope ranging between 0.02-0.1. Type I and type II kink bands in the quartz grains of the en echelon vein sample are denoted by shaded square and open diamond symbols, respectively.

なる複数のドメインの回転パターンが複合しており, basal $<m>$ を示唆する2系統と basal $<a>$ を示す1系統が識別された。Fig. 6 c は完全に再結晶化が進行した試料の分布パターンで、母晶のまわりにランダムにはらつき、系統的な回転パターンを示さない。この様に、動的再結晶が進行するに従って再結晶粒子の方が母晶の結晶方位の周りから徐々にはらついていく

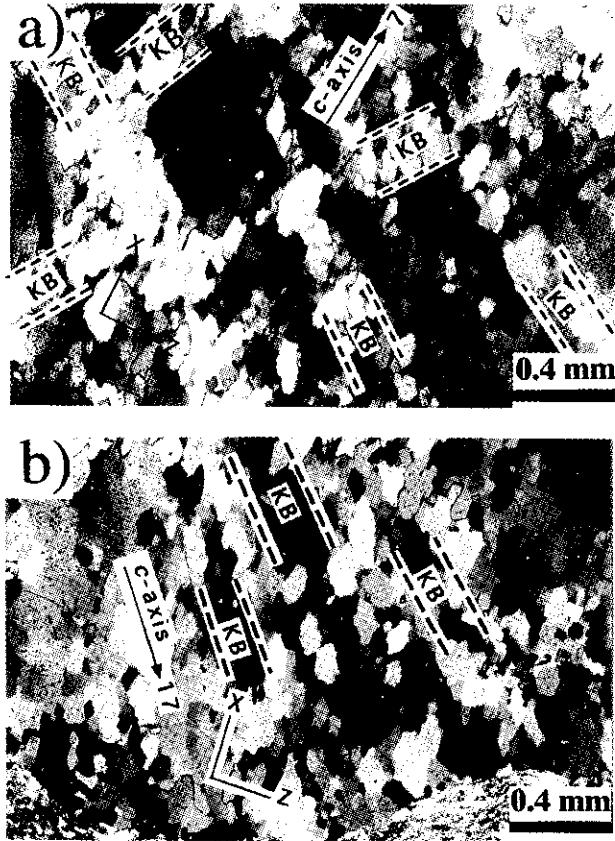


Fig. 9 Optical micrographs showing deformation microstructures where dynamic recrystallization overprinting on the kink structures in the layer parallel veins (after Nishikawa & Takeshita, 1999). a) Microstructure of which a host grain compressed parallel to basal (0001) plane. Recrystallization is restricted within type I kink bands. b) Microstructure of which a host grain compressed oblique to basal (0001) plane. Recrystallization is extensive throughout the whole host grain with type II kink bands.

様子は亜結晶粒子回転機構を特徴づけるものである。

Fig. 2 a の母晶にみられる鋸歯状の粒界形状は、層平行型石英脈には粒界移動によるバルジ核生成 (Bailey & Hirsch, 1962; Urai et al., 1986; 清水, 1998) も起きていることを示している。Hirth & Tullis (1992) の低温変形領域 (Regime 1) の実験では、局所的な粒界移動が起き、その部分に歪が集中することで多結晶体全体の流動応力レベルが低下している。これは、Regime 1 では結晶粒界の動き易さ (易動度) は小さいが、極端な歪エネルギー不均質によって局所的に大きな駆動力が実現したために起きたと考えられる。しかし、層平行型石英脈のようにポリゴン化および亜結晶粒子回転動的再結晶組織がよく発達した試料では、粒界移動再結晶が一部で起きていても、後述するように回復を示唆する転位壁が粒内に多数形成され、転位は比較的均質に分布しているため、再結晶化の過程を通して流動応力の大きな変動は観測されな

かったであろう。

転位下部組織

脆性-塑性境界付近で変形した石英の転位下部組織は、局所的に $10^{13} \sim 10^{14}/\text{cm}^2$ に達する非常に高い転位密度と、複雑に絡まり合った転位の不均質な分布に特徴づけられる (例えば Fitz Gerald et al., 1991; Hirth & Tullis, 1992)。また、原子拡散が遅く回復がほとんど起きないため、転位が再配列した亜粒界 (転位壁) は発達しにくい。しかし、このような変形領域でも、転位密度が高い部分と低い部分からなるセル構造を発達させることで結晶内部の歪エネルギーを下げる効果がはたらいている (たとえば Tullis & Yund, 1977)。Fig. 11 に、本研究の石英脈試料中に発達する転位下部組織を示す。変形に寄与できる自由転位密度は、 $1-3 \times 10^8/\text{cm}^2$ (層平行型) から $2-4 \times 10^9/\text{cm}^2$ (エシェロン型) と非常に高い (Table 1) が、転位の絡まり合いはほとんど認められない。また、しばしば自由転位が basal 面に平行に配列しているのが観察される一方で (Fig. 11 c), 明らかに basal 面にのらない転位線も数多く認められる (Fig. 11 d)。これは活発な転位の上昇を示唆するものかも知れない。また、転位線が basal 面に垂直ないしは高角に配列した転位壁もよく発達している。光学顕微鏡下でポリゴン化の証拠が認められない粒においても、TEM 観察では回復を示唆する転位壁が普遍的に認められ、Fig. 11 a にみられるような粒径 $1-2 \mu\text{m}$ の亜結晶粒が形成されている。このように本研究の試料の微細組織は、Hirth & Tullis (1992) の実験に基づいて定義された Regime 1 と Regime 2 の中間的な特徴を示すものが多い。

低温領域における石英の異方的性質と力学挙動

歪硬化現象

Fig. 8 の軸応力レベルの変化パターンは、圧縮軸に対する basal 面の向きによって多結晶体中の個々の粒子の振舞いが著しく違っていることを示唆する。試料の石英脈では、basal 面すべりに都合よく向いた“軟らかい粒子”だけでなく、圧縮軸と basal 面が平行および垂直に近い“硬い粒子”的座屈も起きている。このことは、最初比較的低応力下で変形を担っていた“軟らかい粒子”が歪の増大とともに硬化を起こし、“硬い粒子”が変形するほど差応力レベルが上昇したことを見出している (Fig. 12)。多結晶体が著しい歪硬化を起こすと、変形モードが塑性変形から脆性破壊へ移行する可能性があるので硬化の機構や素過程を明らかにすることは非常に重要である。歪硬化現象には、転位密度の増加に伴い転位同志が絡まり合ったり相互作用することによってすべりが阻害されるために起こる加工硬化と格子面回転による幾何学的歪硬化

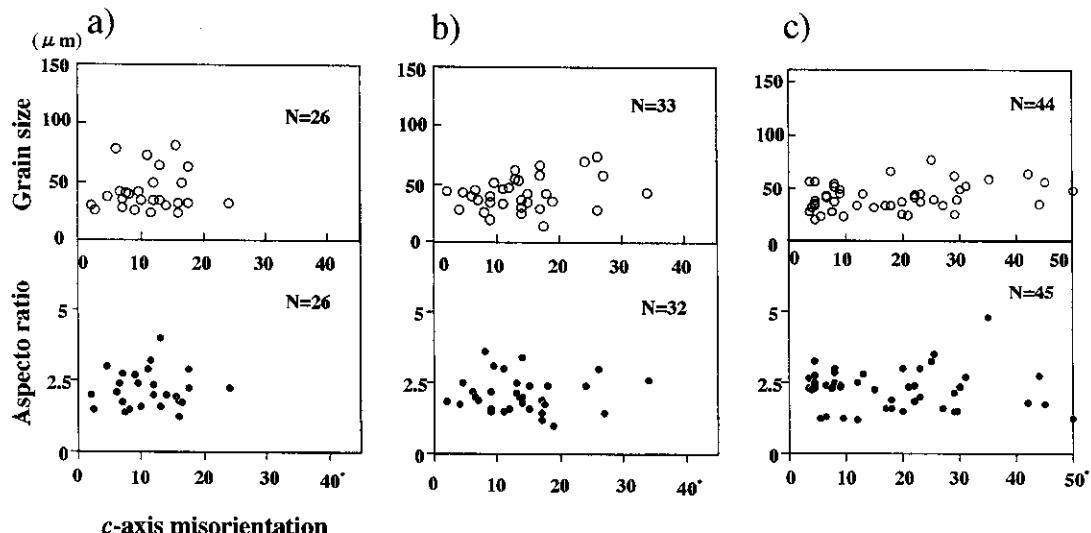


Fig. 10 Diagrams showing the c -axis misorientation angles between neighboring recrystallized grains or subgrains versus grain size (upper box) and aspect ratio (lower box) for selected 3 host grains from the layer parallel veins (after Nishikawa & Takeshita, 1999 b). a) A polygonized, but little recrystallized host grain. b) A moderately recrystallized host grain. c) An extensively recrystallized host grain. N : number of measurement.

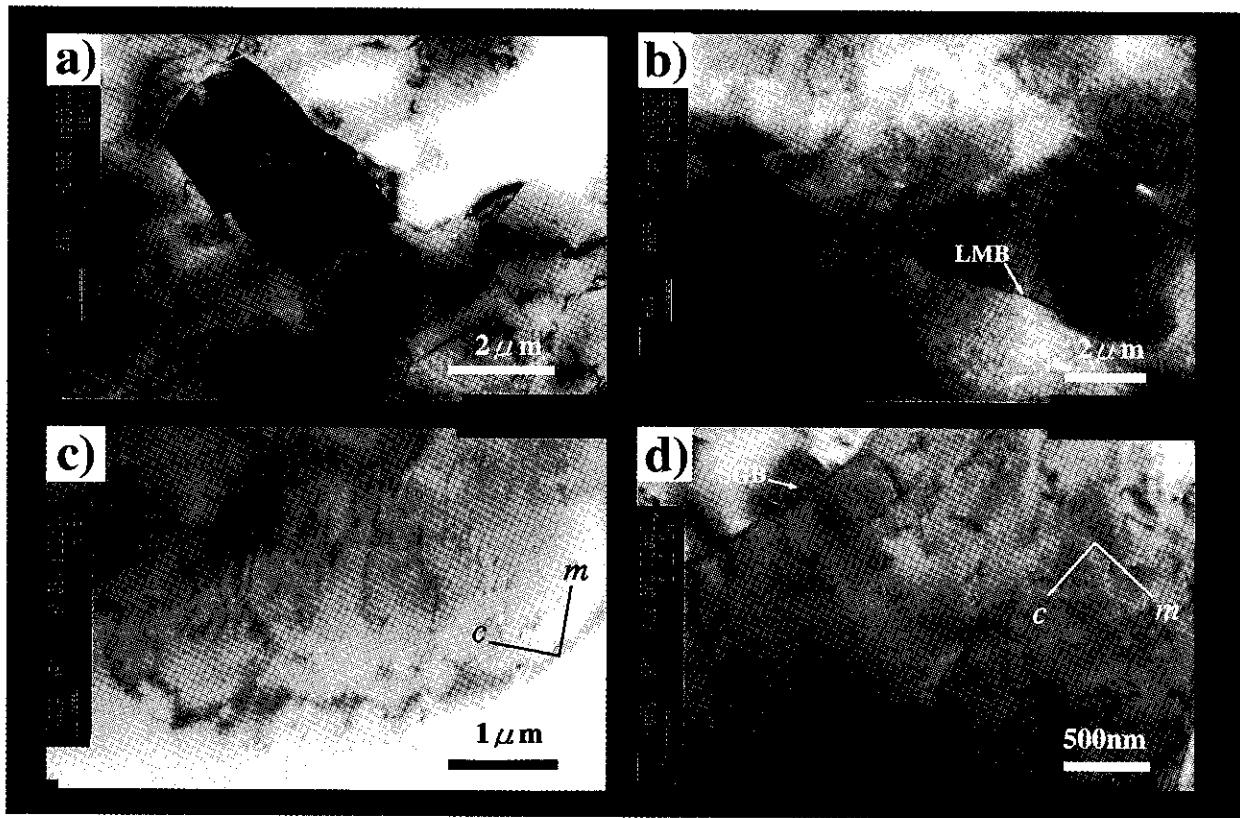


Fig. 11 TEM bright field images of microstructures in deformed quartz grains. (a) Subgrains developed in the en echelon vein. (b) Deformation lamellae and subgrains in the layer parallel vein. (c) Free dislocations and parallel array of deformations in recrystallized grains in the en echelon vein. (d) Free dislocations and subgrain boundaries in recrystallized grains in the layer parallel vein. LMB : deformation lamellae boundary, SGB : subgrain boundary.

(Takeshita & Wenk, 1988) がある。本論で扱った石英の転位密度 (Table 1) は、天然に産する変形岩としては比較的高い値なので (たとえば Twiss & Moores, 1992), 石英脈は加工硬化を起こしている可能性がある。回復が効果的にはたらき転位密度が低く保たれているときの硬化機構としては、転位の相互作用よりも幾何学的歪硬化が重要になると思われる。回復組織がよく発達している層平行石英脈試料について、幾何学的硬化の寄与について検討してみた。座屈による格子面の回転に伴い、キンクバンド内のすべり面に分解される剪断応力は連続的に変化する。作用する軸応力を一定と仮定したとき、すべり方向 (バーガースベクトル) がすべりに最も都合よく向いた粒子においては、バンド内のすべり面 (basal 面) との軸とのなす角 α が低角度のとき、格子回転すればするほどすべり面の分解剪断応力は増大するので回転速度はますます大きくなっていく。しかし、 $\alpha=45^\circ$ 付近を通過すると、すべり面に分解される剪断応力が逆に小さくなるため格子回転速度は次第に遅くなり、最終的に $\alpha=45^\circ$ を過ぎたある角度でロックされることが予想される。Fig. 13 は、層平行型試料中に発達するキンクバンドの回転角 α' を σ_1 軸に対する未変形部分の basal 面の斜交角 θ (つまり、 $\alpha=\alpha'+\theta$) に対してプロットしたものである。多くの粒子は $\alpha=45^\circ$ と 60° を示す直線の間に分布している。これは、上記のモデルの予想と調和的であり、幾何学的歪硬化の影響を示唆していると思われる。

変形応力レベルの見積

石英の動的再結晶粒径、亜結晶粒径及び自由転位密度は、差応力のべき乗と比例関係を示すことが実験的

に知られており、地質差応力計として天然の変形岩に對しても適用されてきた (たとえば Mercier et al., 1977; Ord & Christie, 1984)。差応力に対し、再結晶粒径と亜結晶粒径は、負、転位密度は正の依存性があるので、エシェロン型の石英脈の方が層平行型よりも高応力で変形したと判断される (Table 1)。これは、高応力変形を示唆する subbasal I 型変形ラメラがエシェロン型の石英脈には発達するが、層平行型にはほとんどみられないことからも支持される。Mercier et al. (1977) の動的再結晶粒径差応力計を試料の石英脈に適用すると、変形応力は 20 MPa (層平行型) ~ 300 MPa (エシェロン型) と見積もられる。

Honea & Johnson (1977) は、層状に積み重ねたラバーシートの座屈実験を行い、層間の剪断強度が大きくなればなるほどバンドの幅が狭くなることを示した。すでに述べたように彼らは、これを数値モデルによっても検討し、キンクバンドの幅と剪断強度の関係式 (式(2)) を導いている。剪断強度と、すべり面と軸応力の相対方位 (θ) がわかれば結晶に作用した応力の絶対値が求められるので、 $\theta=0$ 付近の狭い領域でのみ発達する I 型キンクバンドの幅は差応力計として利用できるかもしれない。前章までの議論で明らかにしたように、石英多結晶体中の I 型キンクバンドは“軟らかい粒子”的歪硬化後に形成されたはずなので、その変形応力レベルは多結晶体に作用した変形応力の最大値に近いと推察できる。Fig. 14 は、層平行型およびエシェロン型石英脈の中から異なる微細組織が発達する 8 つの試料を選び、I 型キンクバンドの幅をキンクバンド内部に発達した動的再結晶粒径に対してプロットしたものである。動的再結晶粒径と I 型キンクバンドの幅の関係は、比例定数約 0.5 の直線で近似される。

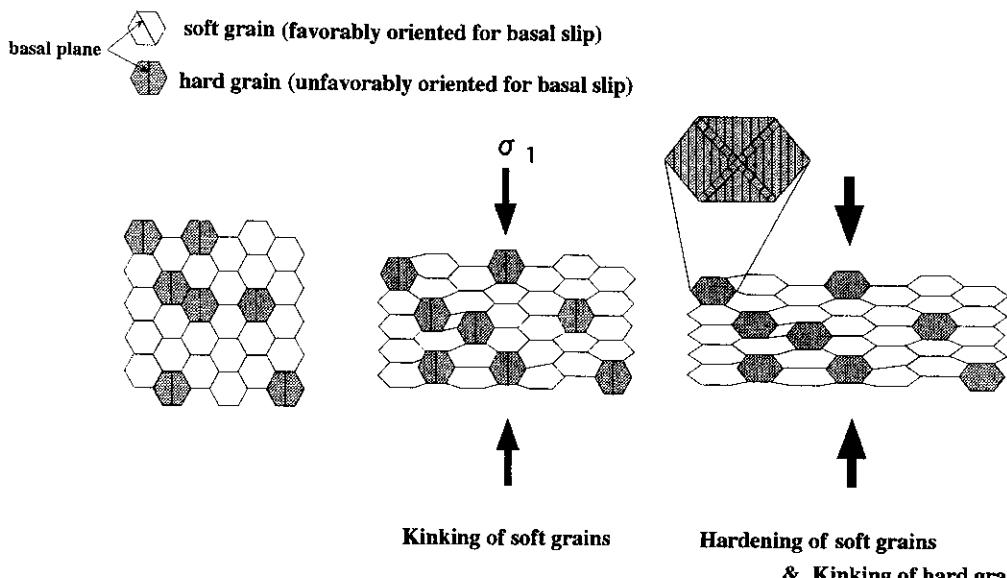


Fig. 12 Schematic diagrams showing the deformation process in a quartz aggregate for the case that only single slip system is operated. (after Nishikawa & Takeshita, 1999 a)

さらに、Mercier et al. (1977) の動的再結晶粒径差応力計で応力値を見積もり、石英のI型キンクバンドの幅 W と差応力 σ の関係を求めるときのような形にな

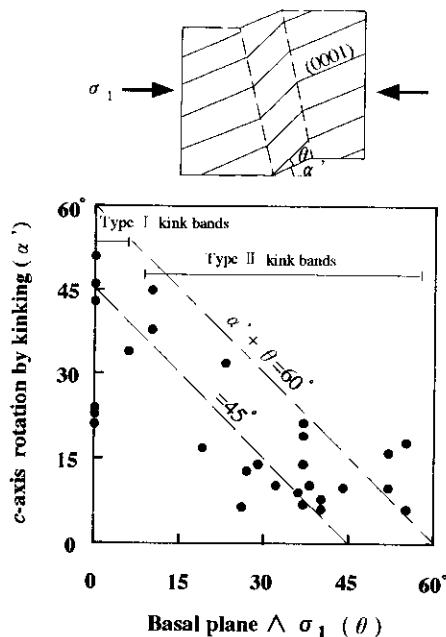


Fig. 13 Diagram showing the rotation angles of host c -axis by kinking (α') versus initial inclination angles of basal plane to the compression axis (θ) for kinked quartz grains from sample 2 (a layer parallel vein). A schematic diagram showing the inclination angle of slip plane in kink bands (α) which is the sum of the rotation angle of basal (0001) plane by kinking (α') and initial inclination angle of basal plane to the compression axis (θ) is also shown. (modified after Nishikawa & Takeshita, 1999 b).

る。

$$\sigma = 1076 W^{-0.82} \quad (4)$$

I型キンクバンドの幅と差応力値の関係は、実験データを用いて精密に決定する必要があるが、式(4)の差応力計は、再結晶が起こっていない低温領域にも適用できるので利用価値は高いと思われる。

低温領域における石英の変形過程

低温領域（緑色片岩相下部）の石英の典型的な変形過程は、次の3つのステージに区分できる (Fig. 15). 1) 単結晶の座屈：高応力条件ではキンクバンド形成に先だって sub-basal 変形ラメラが形成される。最初に basal 面すべりに都合よく向いた粒子が座屈し、II型キンクバンドが形成される。これらの粒子が歪硬化した後に、basal 面が圧縮軸に平行な粒子も座屈を起こし、I型キンクバンドが発達する。キンクバンドの発達は α が 45° を越えたある角度でロックする。2) 再結晶組織の発達：母晶中に増殖した転位は、上昇機構によって、エネルギー的に有利な転位壁（亜結晶粒界）に再配列し亜結晶粒子を形成する。亜結晶粒子は亜結晶粒界に転位を吸収することにより次第に方位差を増大させ、キンクバンド内部のような歪の高い部分から再結晶粒子が生成し始める。3) 多結晶体の変形モードへの移行：母晶全体が再結晶するに従い、単結晶の変形モードは隣接粒子に拘束された多結晶体の変形モードへと遷移する。この一連の変形微細組織発達過程は、結晶方位分布パターンの変化からも見ることが出来る。結晶方位分布は、キンクバンド形成時には活動すべり系に支配された系統的な回転パターンを示すが、キンク構造に重複して再結晶が進行するに従って

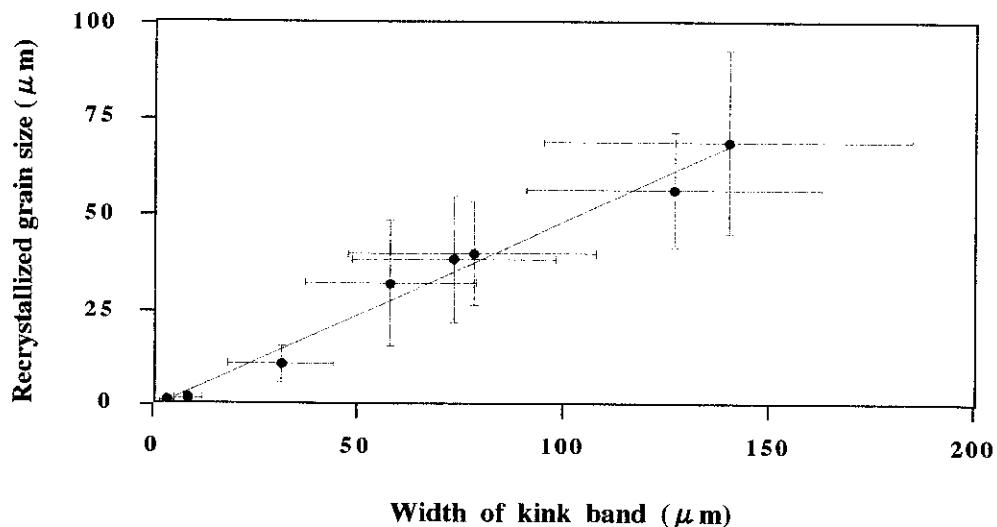


Fig. 14 Diagram showing the mean width of type I kink bands versus dynamically recrystallized grain size within kink bands for 8 samples of the layer parallel and the en echelon veins. For each plot, grain sizes of 20-80 of recrystallized grains and 5-10 widths of type I kink bands are measured. Bars denote a standard deviation ($\pm 1\sigma$).

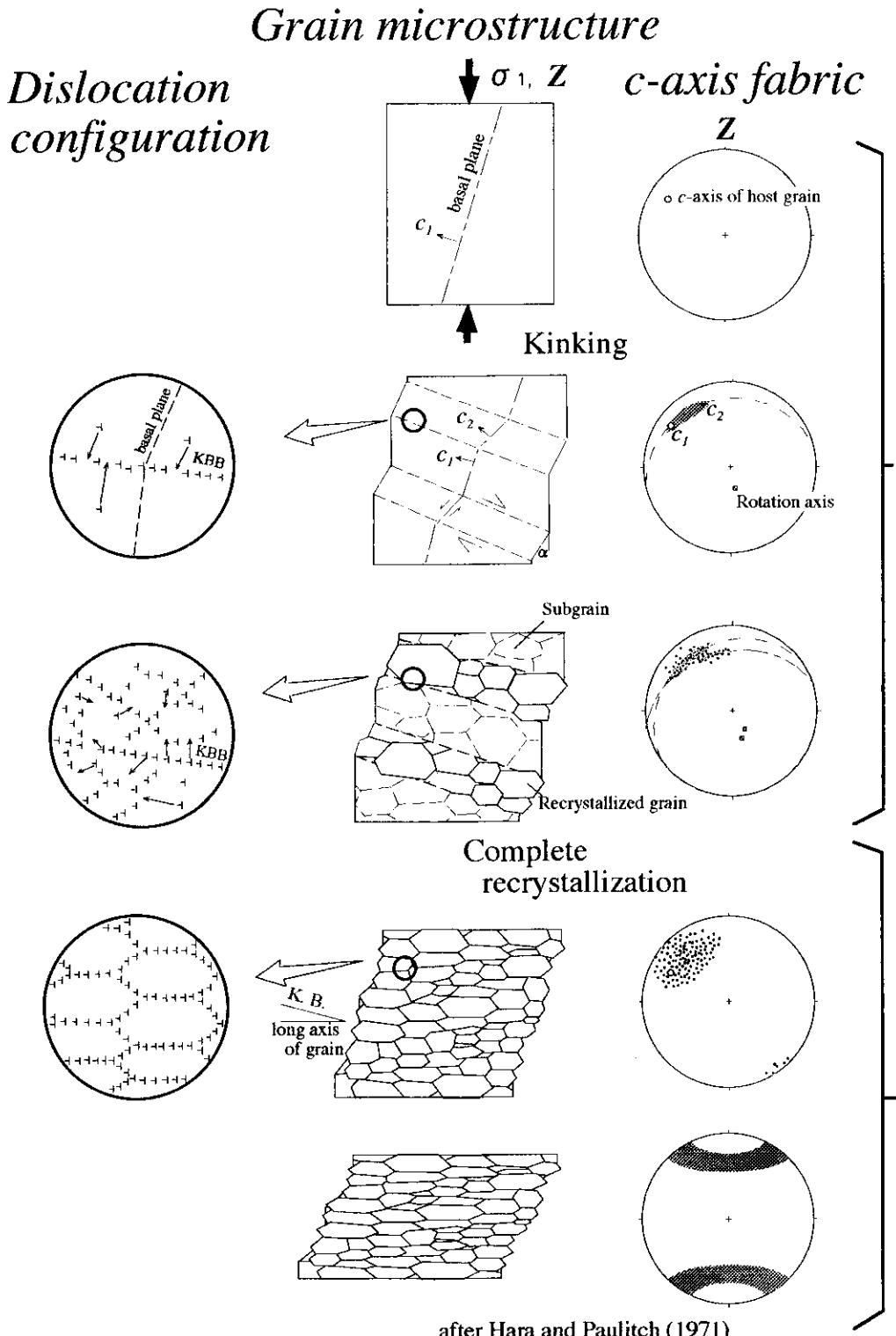


Fig. 15 Schematic diagrams showing the evolutionary process of deformation microstructures in the quartz grain deformed under subgreenschist conditions assuming the sole activation of the basal slip systems. KBB : kink band boundaries. (after Nishikawa & Takeshita, 1999 b.)

結晶方位はばらつき、完全に再結晶化が進行した時点では系統的な回転パターンはもはやみられなくなる。

歪がさらに増大すると再結晶粒子からなる多結晶体は定常状態にむけて再組織化すると考えられる。この

過程では、再結晶による細粒化が結晶を座屈しにくくするなど、これまで支配していた変形様式が起こりにくくなる一方で、別の変形機構が新たに作動するかもしれない。歪增加に伴う亜結晶粒界の高角化は粒界の

易動度を高め、粒界移動を活発化させる可能性がある (Drury et al., 1985)。また、高応力下で著しく細粒の再結晶粒子が形成され、粒成長を抑制する効果も同時ににはたらけば、水を媒体にした粒界拡散による変形機構が促進されるであろう (White, 1977; Stunitz & Fitz Gerald, 1993)。再結晶粒子からなる多結晶体の結晶方位分布も、最終的には変形モードや活動すべり系に支配されたファブリックを形成する。本論で扱った層平行石英脈の場合には、Hara & Paulitsch (1971) で報告されているようなスマールサークル c 軸ファブリックの発達をみるとであろう。これは、隣接粒子による拘束条件下で、結晶内すべりに伴なって格子回転が起きることによって形成されると考えられている (e.g. Lister et al., 1978)。

まとめ

石英の低温変形の実態を石英脈試料の変形微細構造と結晶方位分布の解析に基づいて解説した。小論の内容は、以下のように要約される。

1) 低温領域の石英の活動すべり系は basal $< a >$ よび $< m >$ にほぼ限られる。そのため、変形挙動や変形微細構造はきわめて異方的な性質を示す。 c 軸が圧縮軸に対して斜交する粒子には幅広い単斜型キンクバンド (II型) が比較的低応力で形成される。 c 軸が圧縮軸に垂直な粒の座屈には高い応力が必要で、幅が狭い共役型キンクバンド (I型) が形成される。

2) 本研究で扱った試料において動的再結晶機構は亜結晶粒回転が支配的であった。再結晶粒は、 Z 軸あるいは σ_1 軸に対して垂直方向に伸長する形態ファブリックを示す。再結晶を起こしていない試料においても、TEM観察により、転位壁が発達し回復が普遍的に起きていることが明らかになった。

3) 緑色片岩相下部程度の低温領域での石英の変形は、basal面すべりによる変形ラメラ形成、キンクバンド形成および亜結晶粒回転動的再結晶の順に進行する。亜結晶および再結晶粒子の結晶方位分布パターンの特徴は、変形モードと良い対応を示し、キンク形成時の系統的な回転パターンから動的再結晶が進行するに従いランダムなパターンへ遷移する。

4) 多結晶体中のI型キンクバンドの発達は、II型キンクバンドの形成によって変形が進行していた軟らかい粒子の歪硬化を示唆する。また、低応力下においてはキンクバンドの発達に伴う幾何学的歪硬化の寄与が大きい。

5) 石英の動的再結晶粒径から求めた試料の変形応力レベルは、20~300 MPa程度と見積もられる。I型キンクバンドの幅は、亜結晶粒回転動的再結晶粒径に対して定数0.5の比例関係を示し、変形応力レベルの指標として利用できる可能性がある。

謝 辞

広島大学の竹下 徹氏には、研究の御指導をいたぐとともに原稿作成にあたり有益なご助言を賜った。筑波大学の滝沢 茂氏ならびに大阪教育大学の石井和彦氏には査読をしていただき貴重なご意見を頂いた。竹下 徹氏と広島大学八木公史氏には、試料の一部を提供していただいた。東北大学の宍戸正明氏には薄片を作成していただいた。TEM観察の際には、広島大学の故南 朝生氏に大変お世話になった。以上の方々に感謝致します。

文 献

- Avé' Lallement, H.G. & Carter, N.L., 1971. Pressure dependence of quartz deformation lamellae orientations. *Amer. Jour. Sci.*, **270**, 218-235.
- Bailey, D.W. & Hirsch, P.B., 1962. The recrystallization process in some polycrystalline metals. *Proc. R. Soc. A* **267**, 11-30.
- Banno, S. & Sakai, C., 1989. Geologic and metamorphic evolution of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan. In : Daly, J.S., et al., eds., *Evolution of Metamorphic Belts*. 519-532.
- Carter, N.I. & Friedman, M., 1965. Dynamic analysis of deformed quartz and calcite from the dry creek ridge anticline, Montana. *Amer. Jour. Sci.*, **263**, 747-785.
- Carter, N.I. & Raleigh, C.B., 1969. Principal stress directions from plastic flow in crystals. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **80**, 1231-1264.
- Christie J, Tullis, J. & Blacic, J., 1968. The non rational nature of deformation lamellae in quartz. *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, **49**, 314.
- Drury, M.R., Humpreys, F.J. & White, S.H., 1985. Large strain deformation studies using polycrystalline magnesium as a rock analogue, II, Dynamic recrystallization mechanisms at high temperatures. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **40**, 208-222.
- Drury, M.R., 1993. Deformation lamellae in metals and minerals. In Boland, J.N., Fitz Gerald, J.D., eds., *Defect and Processes in the Solid State : Geoscience Application*. Elsevier Science Publishers B.V., pp. 195-212.
- Faure, M., 1985. Microtectonic evidence for eastward ductile shear in the Jurassic orogen of SW Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **7**, 175-186.
- Fliervoet, T.F. & White, S.H., 1995. Quartz deformation in a very fine grained quartz-feldspathic mylonite : a lack of evidence for dominant grain boundary slid-

- ing deformation. *Jour. Struct. Geol.*, **17**, 1095–1109.
- Fitz Gerald, J.D., Boland, J.N., McLaren, A.C., Ord, A. & Hobbs, B.E., 1991. Microstructures in water-weakened single crystals of quartz. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, B2, 2139–2155.
- Hara, I. & Paulitsch, P., 1971. C-axis fabrics of quartz in buckled quartz veins. *Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen*, **155**, 31–53.
- 原 郁夫・秀 敬・武川賢治・佃 采吉・徳山 満・塙 田次男, 1977. 三波川帯の構造運動. 秀 敬編「三波川帯」, 広島大学出版研究会: 309–390.
- Hara, I., Shiota, T., Hide, K., Kanai, K., Goto, M., Seki, S., Kaikiri, K., Takeda, K., Hayasaka, Y., Miyamoto, T., Sakurai, Y. & Ohtomo, Y., 1992. Tectonic evolution of the Sambagawa schists and its implications in convergent margin processes. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C* **9**, 495–595.
- Hirth, G. & Tullis, J., 1992. Dislocation creep regimes in quartz aggregates. *Jour. Struct. Geol.*, **14**, 145–159.
- Honea, E. & Johnson, A.M., 1976. Development of sinusoidal and kink folds in multilayers confined by rigid boundaries. *Tectonophysics*, **30**, 197–239.
- 河下克志・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, **97**, 959–975.
- Lister, G.S., Paterson, M.S. & Hobbs, B.E., 1978. The simulation of fabric development in plastic deformation and its application to quartzite: the model. *Tectonophysics*, **45**, 107–158.
- Lloyd, G.E. & Freeman, B., 1991. SEM electron channeling analysis of dynamic recrystallization in a quartz grain. *Jour. Struct. Geol.*, **13**, 945–953.
- Lloyd, G.E. & Freeman, B., 1994. Dynamic recrystallization of quartz under greenschist conditions. *Jour. Struct. Geol.*, **16**, 867–881.
- Lloyd, G.E., Farmer, A.B. & Mainprice, D., 1997. Misorientation analysis and formation and orientation of subgrain and grain boundaries. *Tectonophysics*, **279**, 55–78.
- Mercier, J.-C., Anderson, D.A. & Carter, N.L., 1977. Stress in the lithosphere: inferences from steady-state flow of rocks. *Pure appl. Geophys.*, **115**, 199–226.
- Nicolas, A. & Poirier, J.P., 1976. *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks*. Wiley, London, 444 p.
- 西川 治・三沢隆治・小川昇一・大槻憲四郎, 1994. 四国中央部三波川帯低变成岩の構造解析. 地質雑, **100**, 901–914.
- Nishikawa, O., 1997. Microstructural development in quartz during ductile deformation. Ph.D. dissertation, Tohoku Univ. 123 p.
- Nishikawa, O. & Takeshita, T., 1999 a. Dynamic analysis and two types of kink bands in quartz veins deformed under subgreenschist conditions. *Tectonophysics*, **301**, 21–34.
- Nishikawa, O. & Takeshita, T., 1999 b. Progressive lattice misorientation and microstructural development in quartz veins deformed under subgreenschist conditions. *Jour. Struct. Geol.*, (in press).
- Ord, A. & Christie, J.M., 1984. Flow stresses from microstructures in mylonitic quartzites of the Moine Thrust zone, Assynt area, Scotland. *Jour. Struct. Geol.*, **6**, 639–654.
- Poirier, J.P., 1985. *Creep of crystals*. Cambridge university Press. 260 p.
- Sakai, T. & Jonas, J.J., 1984. Dynamic recrystallization: mechanical and microstructural considerations. *Acta Metall.*, **32**, 189–209.
- Seki, S., Hara, I. & Shiota, T., 1993. Transition from flexural-flow folding to flexural-slip folding in the Sambagawa belt. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C* **4**, 685–696.
- Shiota, T., Hara, I., Seki, S., Ikeda, Y., Okudaira, T. & Hide, K., 1993. Sinsitral en echelon folding of the Sambagawa schists and its implication. *Jour. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C* **9**: 671–683.
- 清水以知子, 1998. 岩石における動的再結晶. 地質学論集, no 50, 1–12.
- Sibson, R.H., 1982. Fault zone models, heat flow, and the depth distribution of earthquakes in the continental crust of the United States. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **72**, 151–163.
- Stünitz, H. & Fitz Gerald, J.D., 1993. Deformation of granitoids at low metamorphic grade. II: granular flow in albite-rich mylonites. *Tectonophysics*, **221**, 299–324.
- Takeshita, T. & Wenk, H.R., 1988. Plastic anisotropy and geometrical hardening in quartzites. *Tectonophysics*, **149**, 345–361.
- Takeshita, T., 1995. Dynamic analysis of deformed quartz grains from the folded Middle Miocene Momonoki Subgroup of central Japan: origin of heald microcracks. *Tectonophysics*, **245**, 277–297.
- 竹下 徹・直本啓介・八木公史, 1997. 広島大学理学部地球惑星システム学教室蔵変形岩試料の研究(3)–エシェロン石英脈中の古応力場解析と形成温度 . 広島大学博物館研究報告, no 3, 41–49.
- Trépied, L., Doukhan, J.C. & Paquet, J., 1980. Subgrain boundaries in quartz theoretical analysis and microscopic observations. *Phys. Chem. Minerals*, **5**, 201–218.
- Tullis, J. & Yund, R.A., 1977. Experimental deformation

- of dry Westerly granite. *Jour. Geophys. Res.*, **82**, 5705–5718.
- Twiss, R.J., Moores, E.M., 1992. *Structural Geology*. W.H. Freeman and Company, New York. 532 p.
- Urai, J.L., Means, W.D. & Lister, G.S., 1986. Dynamic recrystallization of minerals. In Hobbs, B.E. & Heard, H.C., eds., *Mineral and rocks deformation : laboratory studies* (The Paterson volume). Am. Geophys. Union, Washington D.C., Geophys. Monogr. Ser. **36**, 161–199.
- White, S.H., 1973. Deformation lamellae in naturally deformed quartz. *Nature*, **245**, 26–28.
- White, S.H., 1977. Geological significance of recovery and recrystallization processes in quartz. *Tectonophysics*, **39**, 143–170.