

マイロナイトにおける石英c軸ファブリックと 微細構造：畑川破碎帯への応用

Quartz c-axis fabric and microstructure in mylonite
—An application to the Hatakawa Shear Zone, northeast Japan—

越谷 信*
Shin KOSHIYA

Abstract

Quartz c-axis fabrics in naturally and experimentally deformed rocks is reviewed. Quartz c-axis fabric pattern strongly depends on temperature, strain rate, strain mode and other physical conditions during deformation of rocks. The change in these conditions causes fabric transition. For example, in greenschist facies, when the strain mode changes from flattening to plane strain field, small-girdle fabric pattern changes into type I crossed-girdle pattern. In the same strain mode of plane strain, when the temperature increases, type I crossed-girdle pattern transfers to type II crossed-girdle pattern. This transition occurs in upper greenschist facies. The Taylor-Bishop-Hill analysis not only succeeds in the simulation of well-known fabric patterns, but also gives the reasonable explanation of these fabric transitions.

Mylonite in the Hatakawa Shear Zone shows two types of quartz c-axis fabric patterns. One of them corresponds to "type I crossed-girdle pattern", and the other is similar to a variation of "type II crossed-girdle pattern". Each pattern retains its feature regardless of recrystallization grade. The quartz grains in the samples showing "type I pattern" are strongly elongated to show S-type (MASUDA & FUJIMERA, 1981) micro-structures. In the other hand, the grains of "type II pattern" are equant and equidimensional, so they resemble to "P-type". This micro-structural relationship is controlled by the temperature-strain rate regimes.

はじめに

石英のc軸ファブリック（注）は SANDER (1911) 以来、多くの研究者により検討されてきた。様々な地域から数多くのファブリック・パターンの例が報告されたが、系統的に整理されていない。初期の研究では、変形機構が十分に解明されていなかったこともあり、ファブリック・パターンは主に対称性や歪主軸との幾何学的関係において議論されていた。この傾向は1970

年代まで続いた。ところが、1977年から LISTER を中心とするグループが Taylor-Bishop-Hill モデルを用いて各種のファブリック・パターンをコンピューター・シミュレートした一連の論文を発表した。このモデルでは多結晶体の変形が個々の結晶内の転位すべりによりもたらされると仮定している。そのため、現在では歪主軸や歪モードとファブリック・パターンとの幾何学的関係のみならず、転位すべりという変形機構に基づいて変形時の温度・歪速度条件との議

* 東北大学理学部地質学古生物学教室

論が可能になった。

また、石英の微細構造についても多くの研究がある。これらのうち、MASUDA & FUJIMURA (1981) は高温高圧実験により、石英の微細構造が温度・歪速度条件により2つのタイプに分類されることをみいだした。

本論文では、はじめに石英のc軸ファブリックについて歪モード・歪量・変成度・non-coaxial deformation という観点から、天然の変形石英岩やマイロナイト、高温高圧実験、コンピュータ・シミュレーションなどの研究結果をレビューする。次に、石英のc軸ファブリック・パターンと微細構造との関係について、畑川破碎帯のマイロナイトを例として検討する。

(注) ファブリックという語と同じ意味で、地質学では格子定向配列、LPO (lattice preferred orientation)・ゲフェューゲ (Gefüge) が用いられる。また、金属学ではこれと同じ意味で集合組織、texture が用いられるが、地質学では texture を別の意味にも使うので、ここでは混乱を防ぐため、ファブリックという語で統一して用いる。

石英c軸ファブリックに関する総括

1. 天然の変形岩における石英c軸ファブリック

1-A. c軸ファブリックの分類

現在までのところ、coaxial deformation の場合の石英のc軸ファブリック・パターンは次の6通りに分類できる (WHITE, *et al.*, 1980; TULLIS *et al.*, 1973; PRICE, 1985; TAKESHITA, 1987)。すなわち、type I crossed-girdle, type II crossed-girdle (LISTER, 1977), Point maximum, small-girdle (TULLIS *et al.*, 1973), cleft girdle (PRICE, 1985) および X-point maximum (BLUMENFELD *et al.*, 1986) である (Fig. 1)。これらのパターンの特徴は以下の通りである。

<type I crossed-girdle> 歪の最大圧縮軸 (Z) のまわりの小円ガードルと、それらを結び中間軸 (Y) を通る大円ガードルよりなる。

<type II crossed-girdle> Y軸を通る2つの対称な大円ガードルよりなる。

なお、type I girdle や type II girdle のパターンは歪量の増加に伴い、それぞれYZ面内に2つの集中域をもつパターンとY軸方向に1つの集中域をもつパターン (Y-maximum) に漸移する (Fig. 2)。

<(Z-) point maximum> Z軸方向の1つの集中域よりなる。

<small-girdle> Z軸のまわりの小円ガードルよりなる。

<cleft-girdle> 最大伸長軸 (X) のまわりの opening half angle が45°以上の小円ガードルよりなる。

<X-point maximum> X軸方向の1つの集中域よりなる。

以上の6通りのファブリック・パターンの他に、三波川帯より単結晶状ファブリックおよび2結晶状ファブリックが報告されている (SUZUKI, 1970, 鈴木ほか, 1986, 鈴木ほか, 1987)。

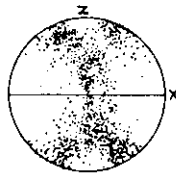
1-B. 歪モードとファブリック・パターンとの関係

同一の変成度のもとで変形した岩石において、ファブリック・パターンと歪モードには一定の関係があるといわれている (PRICE, 1985)。例えば、変成度が緑色片岩相で変形した石英岩の場合、type I crossed-girdle pattern と small-girdle pattern はそれぞれ平面歪または general flattening 型歪と、一軸圧縮型歪に対応する (MAJORIBANKS, 1976; LAW *et al.*, 1984; LAW, 1986) (Fig. 3)。また、type II crossed-girdle pattern は平面歪-constrictive 型歪で変形した岩石から報告されている (BOUCHEZ, 1977; MILLER & CHRISTIE, 1981)。

1-C. 変成度とファブリック・パターンとの関係

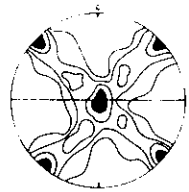
前述のファブリック・パターンのうち type I

type I crossed-girdle



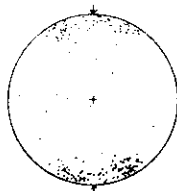
(after Law et al., 1984)

type II crossed-girdle



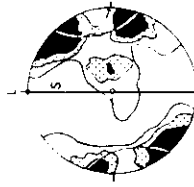
(after Lister & Dornsiepen, 1982)

(Z-)point maximum



(after Tullis, 1977)

small-girdle



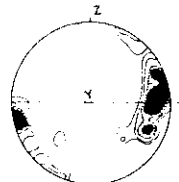
(after Majoribanks, 1976)

cleft girdle



(after Burg & Teyssier, 1983)

X-point maximum



(after Blumenfeld et al., 1986)

Fig. 1 Typical fabric patterns of quartz c-axis.

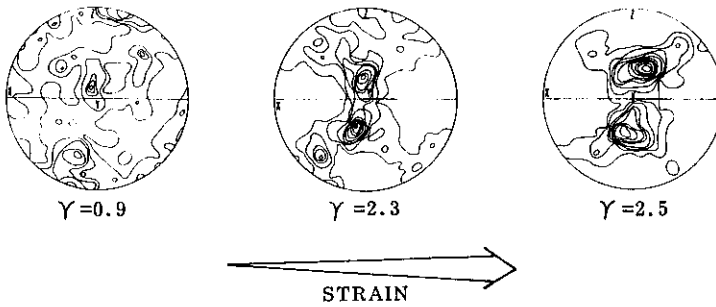
crossed-girdle, small-girdle, type II crossed-girdle, X-point maximum の各パターンは概ねそれぞれ異なる変成度に対応している (Fig. 3). type I girdle パターンを示す岩石は低または中緑色片岩相 (WILSON, 1975 ; CARRERAS *et al.*, 1977 ; LAW *et al.*, 1984) や緑色片岩相 (EISBACHER, 1970 ; TULLIS, 1977 ; LISTER & DORNSIEPEN, 1982 ; LAW, 1986) で変形したものが多し。small-girdle パターンも同様に緑色片岩相で変形した岩石に見られる (LAW *et al.*, 1984 ; LAW, 1986). type II girdle パターンは高緑色片岩相から角閃岩相 (WILSON, 1975 ; BERTHÉ *et al.*, 1979 ; MILLER & CHRISTIE, 1981) およびグラニュライト相 (LISTER &

DORNSIEPEN, 1982) で変形した岩石から得られている。以上のことから type I girdle・small-girdle パターンと type II girdle パターンの境界は高緑色片岩相付近にあると考えられる。また、X-point maximum パターンは花こう岩のソリダスのごく近傍で形成されるという (BLUMENFELD *et al.*, 1986)。

1-D. non-coaxial deformation と c 軸ファブリックの非対称性

1-A, 1-B, 1-Cの項で示したように、coaxial deformation の下でのファブリック・パターンは歪主軸 X, Y, Z を座標系として表示できる。これに対して、non-coaxial deformation

type I crossed-girdle
(after Hara et al., 1973)



type II crossed-girdle
(after Sylvester & Christie, 1968)

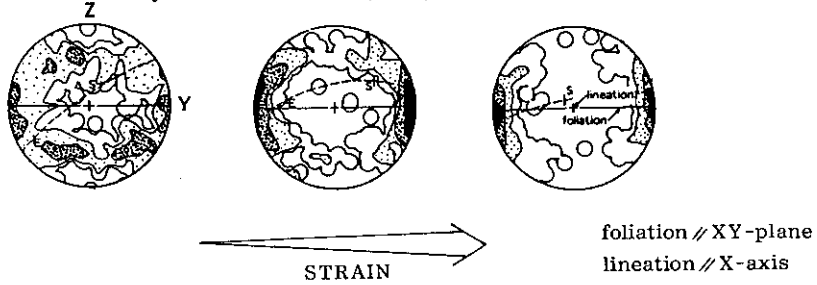


Fig. 2 Sequential changes of quartz c-axis fabric patterns due to increasing strain.

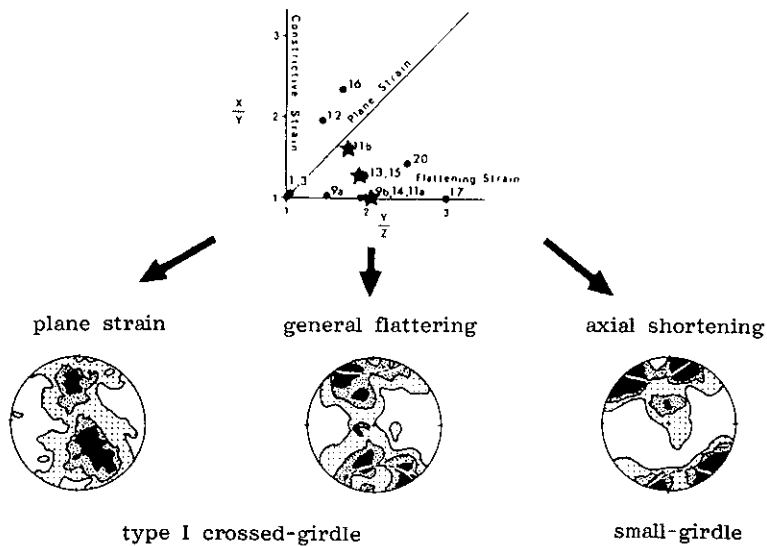
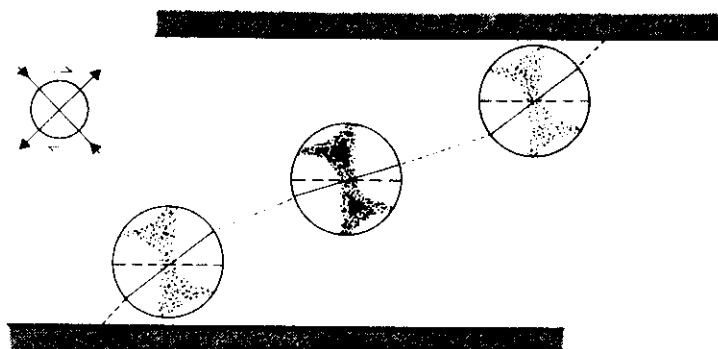


Fig. 3 Correlation between strain geometry (Flinn diagram of the upper figure) and quartz c-axis fabric patterns.

のファブリックの場合には運動学的枠組みを座標系としたときに、せん断のセンスを示す非対称性が認められる (Fig. 4A, LISTER & WILLIAMS, 1979)。したがって、この場合には、せん断面とせん断方向を座標系としてファブリック・パターンを表示し方が都合が良い。“skeltal outline

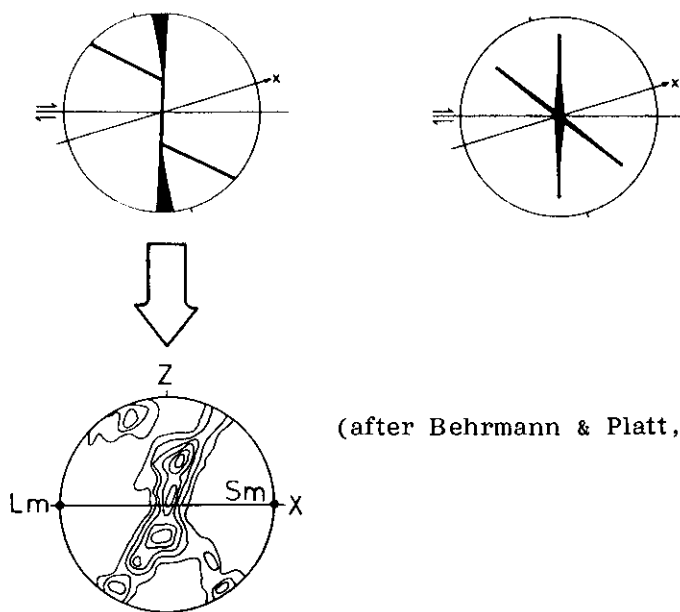
(注)”を用いた場合、type I girdle でも type II girdle でも、最も明瞭なガードルはせん断方向に直交し、2次的なガードルの非対称性からせん断のセンスがわかる (Fig. 4B)。non-coaxial deformation で形成されたファブリックの例には、LISTR & WILLIAMS (1979), BEHRMANN

A (after Lister & Williams, 1979)



B type I crossed-girdle

type II crossed-girdle



(after Behrmann & Platt, 1981)

Fig. 4 Asymmetric patterns of quartz caxis fabric formed under non-coaxial deformation. A : The sense of shear is deduced from the asymmetric fabric pattern. B : “skeltal outline” analysis gives the sense of shear.

& PLATT (1982), LISTER & SNOKE (1984) などがある。

(注) “skeltal outline”とはコンターを施した極図形上で峰にあたる部分を結んだものである。

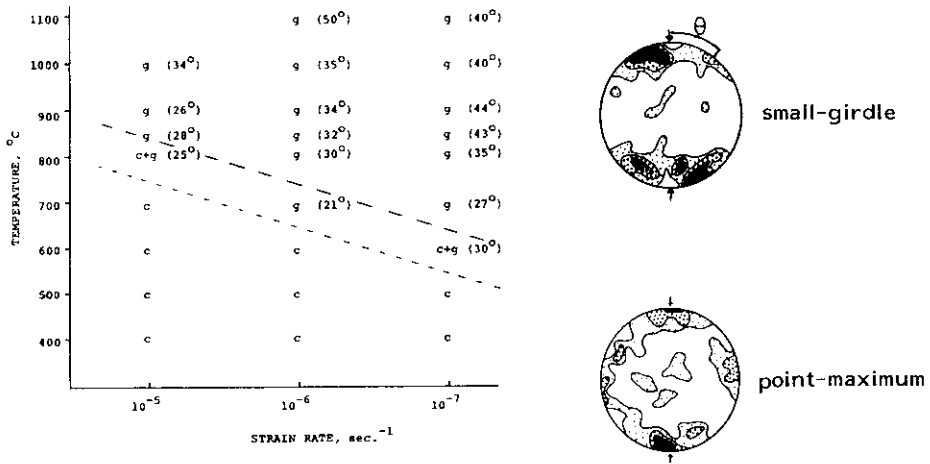
2. 高温高圧実験による石英c軸ファブリック

TULLIS *et al.* (1973)は高温高圧下で一軸圧縮試験を行い、石英のc軸ファブリック・パターンは温度や歪速度に伴って変化することを示し

た。彼等の実験によると、より低温または高歪速度ではc軸ファブリック・パターンは(Z-) point maximumパターンであり、より高温または低歪速度ではsmall-girdleパターンである (Fig. 5A)。また、small-girdleパターンの opening half angle はより高温またはより低歪速度で大きくなる (Fig. 5A)。

上記の実験結果は一軸圧縮型の歪に対応しているが、さらに TULLIS (1977)は平面歪変形試験を行い、その結果を比較した。平面歪試験では温度・歪速度条件が同じならば、上述の一

A Axial shortening
(after Tullis *et al.*, 1973)



B Plane strain
(after Tullis, 1977)

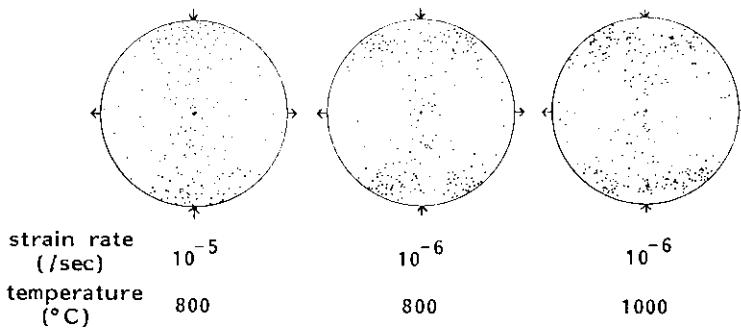


Fig. 5 Quartz c-axis fabric patterns in experimentally deformed rocks. A : axial shortening experiments. “g” and “c” show small-girdle pattern and (Z) point maximum pattern, respectively, B : Plane strain experiments.

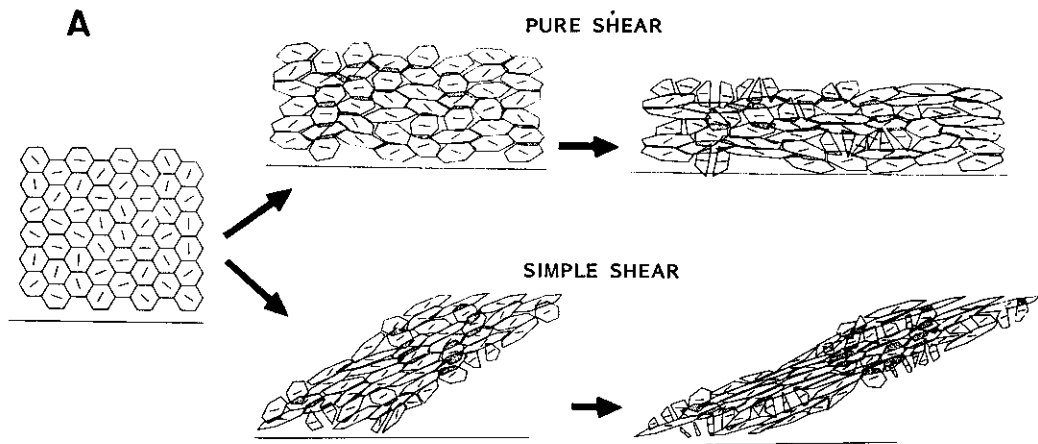
軸圧縮型歪のパターンに最大引張方向に直交する connecting girdle がつけ加わったパターンが形成されることがわかった (Fig. 5B)。これにより, small-girdle と type I girdle パターンの違いは歪モードによることが判明した。

3. ファブリックのコンピューター・シミュレーション

3-A. ETCHECOPAR (1977) によるモデル

このモデルでは転位のすべり系が1つしかない結晶の場合, その多結晶体が2次元でどのように変形するかを扱っている。初期状態としてそれぞれランダムな方向のすべり面(線)をもった六角形粒子の集合体を想定する。それが, 純粋せん断および単純せん断を受けたとき, 隣接する粒子の重複する部分を最少にするようにする。その結果, 結晶方位を表すもしとしてすべり線の分布が得られる (Fig. 6A)。

彼の計算結果によると, 結晶方位の分布は歪



B Slip Line Direction Distribution

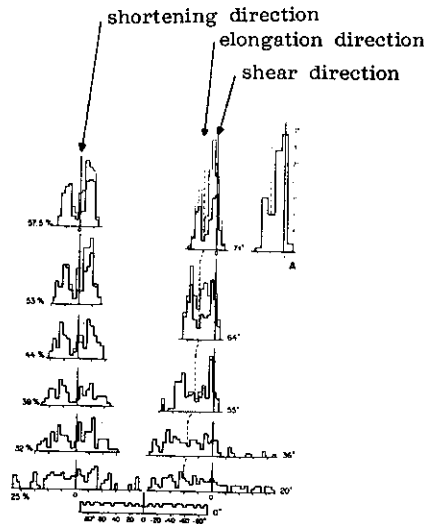


Fig. 6 Computer simulation of two dimensional model polycrystals, each crystal in which has only one slip system. A : Pure shear and simple shear deformation. B : Slip direction distributions. (after ETCHECOPAR, 1977)

軸に対して bimodal な分布を示す。純粋せん断ではすべり線は圧縮軸に対して対称な2つの集中をなし、単純せん断では非対称な分布を示す (Fig. 6B)。

3-B. Taylor-Bishop-Hill 解析によるモデル

LISTER *et al.* (1978), LISTER & HOBBS (1980) は Taylor-Bishop-Hill 解析を用い、石英の結晶中にいくつかのすべり系の存在を考え、石英

(3) 転位すべりの運動は rigid-plastic flow で行われる。

もしすべり系がひとつしかないとする、加えられた応力に対して都合のいい方向をむいたすべり系をもつ粒子しか変形できず、粒界に隙間や重複ができてしまう (Fig. 7b)。そこで、それぞれの粒子内でいくつかのすべり系が同時に活動し、すべての粒子が均一に変形すると仮定することにより、strain compatibility を満足させるわけである (Fig. 7c)。(1), (2)を

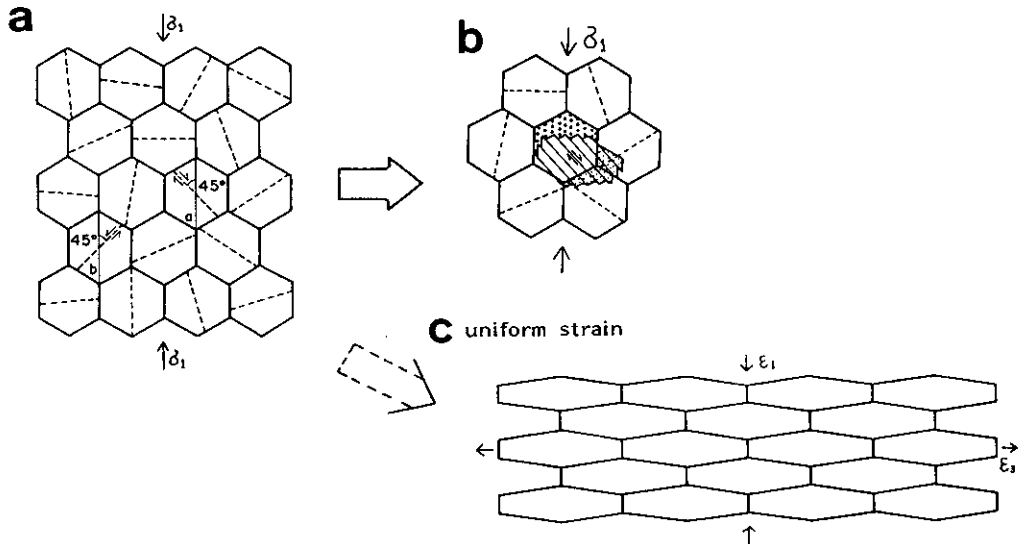


Fig. 7 Deformation of polycrystal. a : Initial polycrystal. Broken lines show easiest slip planes. b : Deformed polycrystal of single slip system model. c : Uniformly deformed polycrystal. (after TAKESHITA, 1986)

c 軸ファブリックを3次元的に計算し、1-Aで述べたファブリック・パターンの大部分をシミュレートすることに成功した。以下にこのモデルの概要を述べる。なお、詳細については、GIL SEVILLANO *et al.* (1980), 竹下 (1986) 等を参照されたい。

このモデルでは次の3つを仮定している。

- (1) すべての変形はいくつかのすべり系の転位すべりのみによって達成される。
- (2) 多結晶体中のすべての石英粒子は同一の変形を受ける。

仮定したとき、格子回転は数学的には次のように表される。粒子ひとつに加えられた変位勾配テンソルを E^c とすると、 E^c はすべり系による変形だけでは満足されず、additional rotation が必要である (Fig. 8)。つまり、

$$E^c = \Omega^c + \sum_{s=1}^n E^s \quad (1)$$

となる。ここに、 Ω^c は additional rotation を表すテンソル、 $\sum_{s=1}^n E^s$ は n 個のすべり系により達成された変位勾配テンソルの合計である。この additional rotation により結晶軸が回転する。さらに、必要なすべり系の数は次のよう

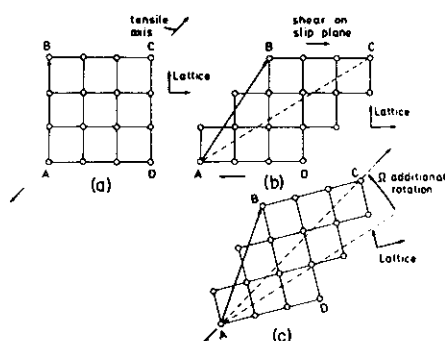


Fig. 8 a-b : A shear on a slip a plane does not cause the lattice to rotate, although a material vector may rotate (e. g. vector AB). b-c : An additional rotation, which also causes the crystal lattice to rotate, will bring the crystal in a position corresponding to the strain forced upon it. (after GILL SEVILLANO *et al.*, 1980)

I girdle, small-girdle, type II girdle, (Z-) point maximum, cleft-girdle の各パターンをシミュレートし、様々な歪モード・歪量との関係を明らかにした、例えば、LISTER & HOBBS (1980) では CRSS を Table 1 のように設定した model quartzite を考えた。それらの計算結果は Fig. 9 と Fig. 10 に示すとおりである。CRSS の値は一般に、変形時の温度・封圧・含水量が増加し、歪速度が減少すると、rhombohedral すべり系および prismatic すべり系で減少し、その逆のときは、basal すべり系で減少する。前者の場合は model quartzite C に対応し、後者の場合は model quartzite B に対応する。平面歪のとき、それぞれのファブリック・パターンは type II girdle パターンと type I girdle パターンになる。これらのことは 1 の項で述べた天然の変形岩の石英 c 軸ファブリックの場合とよく一致しており、現在のところ、この Taylor-Bishop-Hill 理論を用いたモデルが最もよく説明している。

にして求められる。式(1)の対称部分、つまり歪部分 E^c は、

$$E^c = (1/2) (E^c + E^{cT}) = (1/2) \sum_{s=1}^n (E^s + E^{sT}) \quad (2)$$

となる。ここに、 E^{cT} 、 E^{sT} はそれぞれ E^c 、 E^s の転置行列である。これを添字表示すると、

$$d \epsilon_{ij}^c = (1/2) (d \epsilon_{ij}^{c^s} + d \epsilon_{ji}^{c^s}) = (1/2) \cdot \sum_{s=1}^n (r_i^s v_j^s + r_j^s v_i^s) d \gamma^s \quad (3)$$

となる。ここに、 r_i^s 、 v_j^s はそれぞれすべり方向およびすべり面の法線を表す単位ベクトルである。 $d \gamma^s$ はすべり系 s のせん断量である。式(3)と非圧縮性の条件から任意の変形を満足するには少なくとも 5 つのすべり系が必要であることがわかる (Von Mises の条件)。

また、転位すべりの運動が rigid-plastic flow に従うから、それぞれ転位の臨界せん断応力 (CRSS ; critical resolved shear stress) を与えれば、対応するファブリックが求められる。

この Taylor-Bishop-Hill モデルにより、LISTER *et al.* (1978), LISTER & HOBBS (1980) は type

4. 今後の展望と問題点

上述のように、石英の c 軸ファブリックは歪モード・歪量などの運動学的枠組みや歪速度・温度などの変形時の物理条件を強く反映しており、それらの諸条件を復元するためのよい指標となりうる (Fig. 11)。例えば、ファブリックの非対称性からせん断のセンスを求めたり、ファブリック・パターンの変化により歪速度や温度の変化を知ることができよう。また、Taylor-Bishop-Hill モデルとの比較により c 軸ファブリックの発達程度から歪量・歪モードがわかる場合もある (KRONENBERG, 1981)。さらに、カンラン石のファブリックと上部マントルの異方性の関係 (唐戸, 1986) のように、石英のファブリックから地殻の構造になんらかの示唆が与えられるかもしれない。

一方で Taylor-Bishop-Hill モデルには再結晶作用によるファブリックの形成についてはなんの説明もされていないという不完全性がある。また、CRSS についても基盤データがまだ不

CRITICAL RESOLVED SHEAR STRESS VALUES				
		MODEL A	MODEL B	MODEL C
BASAL	<A>	1.00	1.00	1.00
PRISM	<A>	4.00	...	1.00
1-1 RHOMB	<A>	...	3.00	...
1-1 RHOMB	<A>	...	3.00	...
1-1 RHOMB	<C+A>	...	3.00	...
1-1 RHOMB	<C+A>	3.00	3.00	...
STEEP DIPYRAMID	<C+A2>	3.00
STEEP DIPYRAMID	<C+A3>	2.50

Table 1 CRSS values for each of three model quartzites. (after LISTER & HOBBS, 1980)

Model Quartzite A

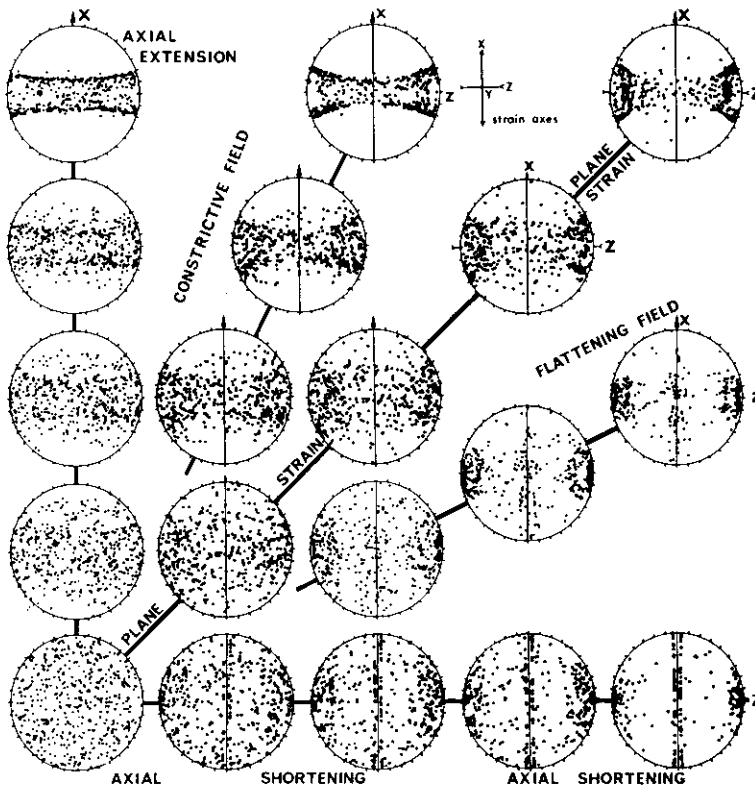
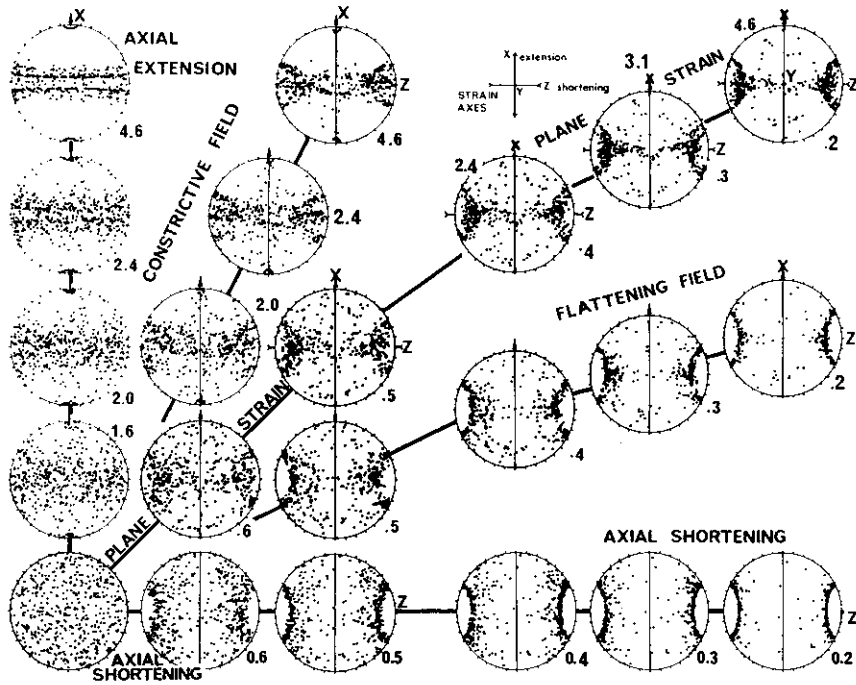
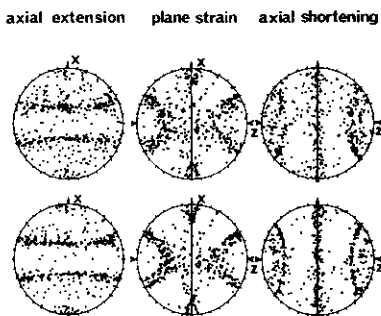


Fig. 9 c-axis fabrics predicted by Taylor-Bishop-Hill analysis for model Quartzite A and coaxial deformation. (after LISTER & HOBBS, 1980)

A Model Quartzite B



B Model Quartzite C



C

Simple Shear

Model B

Model C

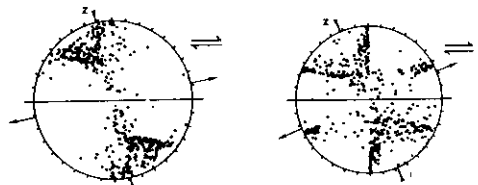


Fig. 10 A,B : c-axis fabrics predicted for model quartzites B and C, respectively, in coaxial deformation. C : c-axis fabrics predicted for model quartzites B and C in simple shear. (after LISTER & HOBBS, 1980)

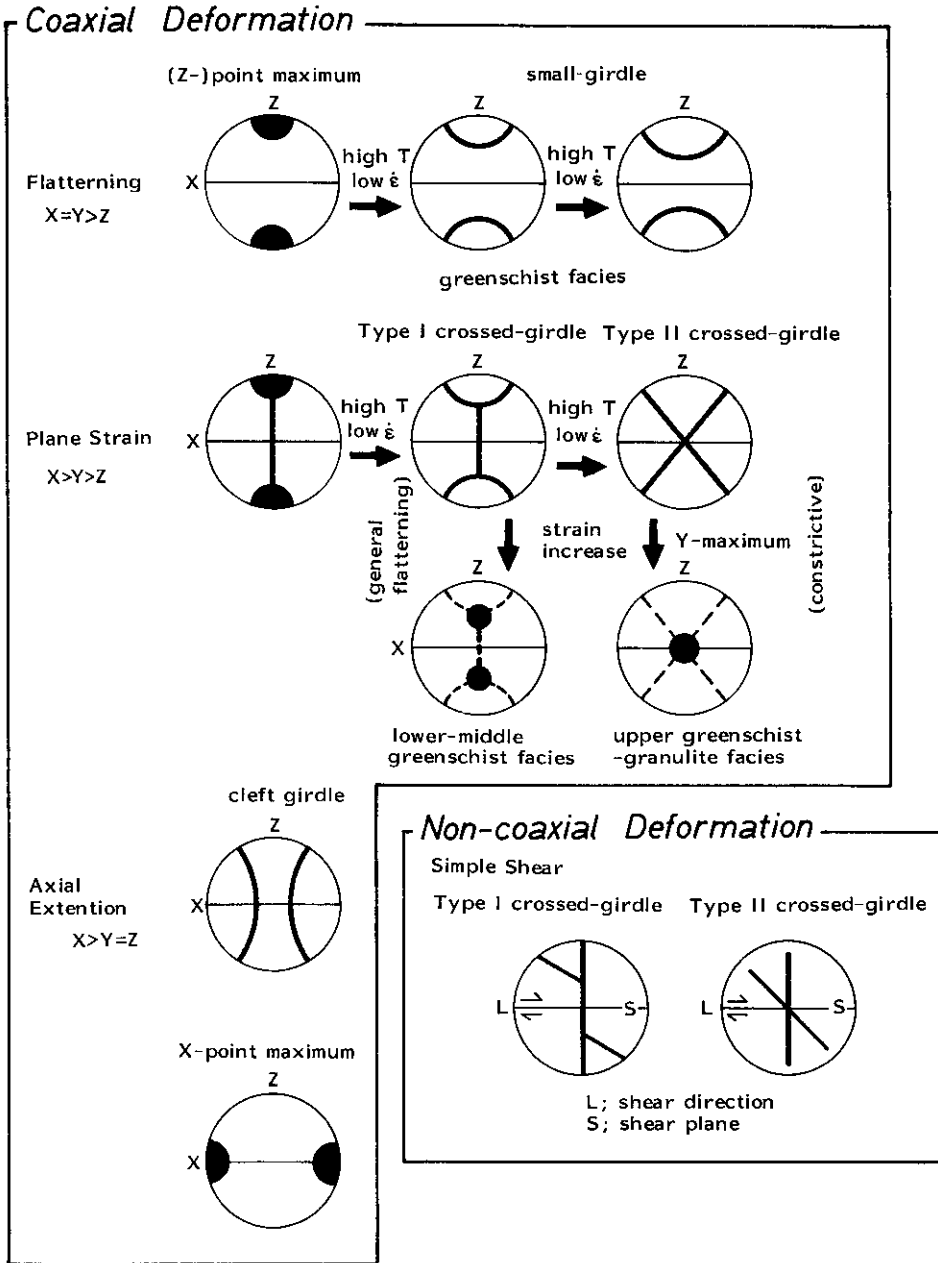


Fig. 11 Relationship between quartz c-axis fabric patterns.

十分である。今後、天然の試料の検討ばかりでなく、実験的や理論的研究が望まれるところである。

細川破碎帯のマイロナイト

細川破碎帯には花こう岩類を原岩とするマイロナイトが広く分布している。それらのマイロナイトには層状珪酸塩鉱物などの形態定向配列

によって特徴づけられる面構造・線構造が発達している。越谷 (1985) にもあるように、鏡下での観察によると、石英の集合体や集合体中の個々の石英粒子が、上記の面構造に斜交している。このことはこれらの構造が non-coaxial deformation により形成された S-C マイロナイトであることを示す。

試料は阿武隈山地東縁の昼曽根付近の請戸川上流地域から採取したものをを用いた (Fig. 12)。また、石英 c 軸ファブリックや微細構造の観察・

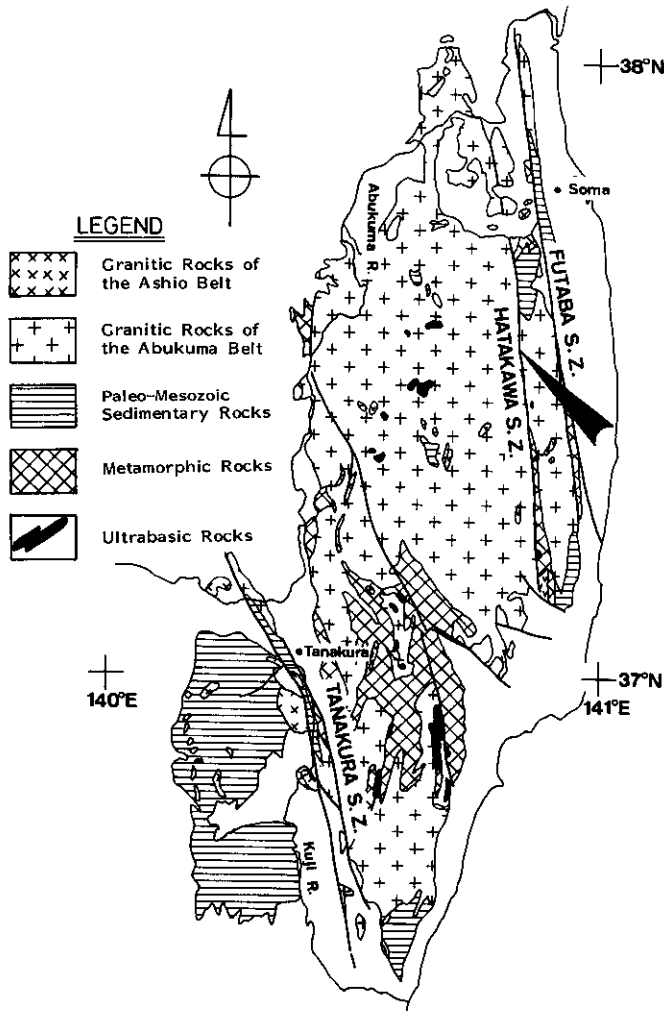


Fig. 12 The schematic geological map of the Abukuma Plateau, northeast Honshu, Japan. Arrow shows the locality of samples.

測定はマイロナイトの面構造 Sm に直交し、線構造 Lm に平行な薄片で行った。

1. 石英c軸ファブリック

石英c軸ファブリックの測定は、TURNER & WEISS (1963) の方法により、ユニバーサル・

ステージを用いて行った。10個の試料についてそれぞれ 100-210 個の石英粒子のc軸を測定した。

測定した10個の試料のc軸のファブリック・パターンは次の2つのタイプに分けことができる (Fig. 13)。ひとつのタイプは線構造 Lm に直交する面内に2つの集中域をもつ部分ガ-

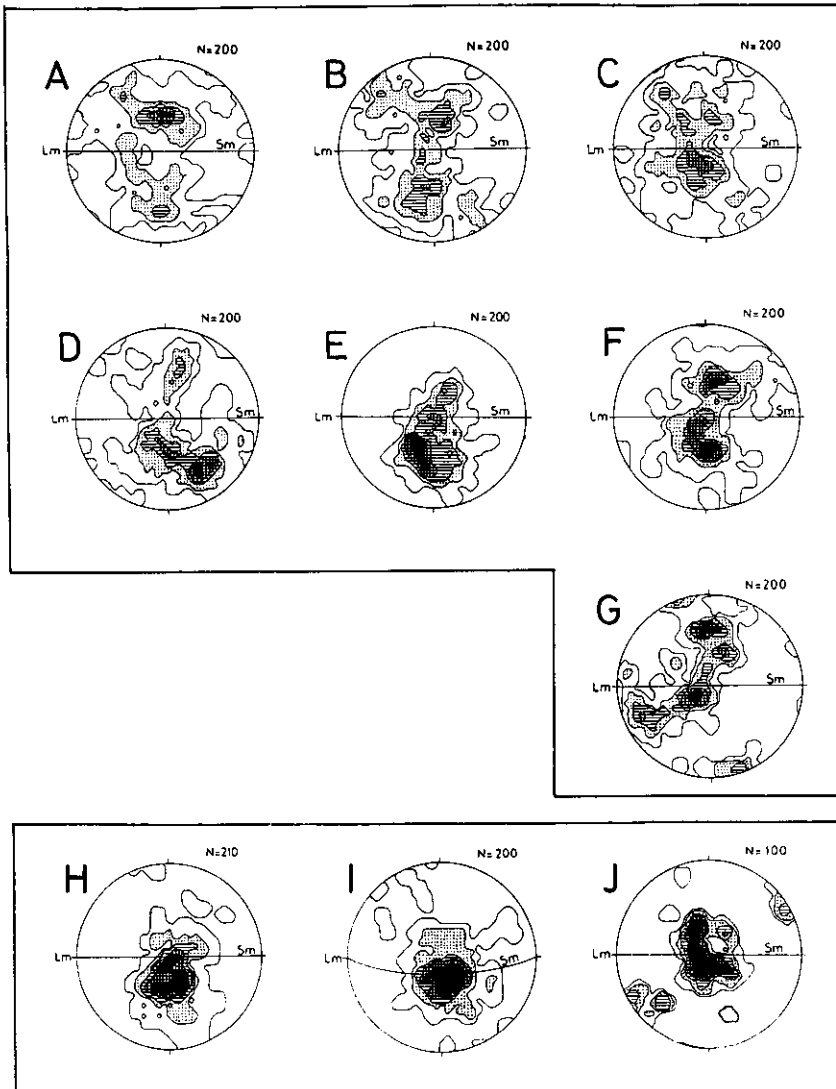


Fig. 13 Pole figures of quartz c-axes. Lower hemisphere projection. Contours ; 0.5% <, 2% <, 4% <, 6% <, 8% <, 10% <. The upper seven figures are "type I crossed-girdle patterns", and the lower three are varieties of "type II crossed girdle pattern".

ドルと面構造のボールのまわりの部分小円ガードルよりなる。これらは type I crossed-girdle pattern に対比される。せん断方向 Lm に対する非対称性には一定の関係は認められない。もうひとつのタイプは面構造 Sm の面内にあり、線構造 Lm に直交する方向にひとつの集中域をもつタイプである。集中域がやや広いものの、このタイプは変形量の大きい場合の type II girdle pattern のバリエーションで、すなわち Y-maximum パターンに類似している。調査地域内でこれらのタイプの分布地域が異なっている。type I girdle パターンを示す試料はより南側に分布し、Y-maximum パターンを示す試料はより北側の請戸川付近に分布している (Fig. 14)。

また、石英粒子の集合体を指標として歪解折を行った結果、type I girdle を示す試料は平面歪または general flattening 歪で形成され、Y-maximum を示す試料は平面歪または constrictive 歪で形成されたことがわかった (越谷, 1987)。

2. 微細構造

前述のように石英のc軸ファブリックは2種類のタイプに分けられるが、ここではそれぞれの微細構造がどのように異なっているかを検討

する。マイロナイト中の石英は個々の粒子の形の変化や再結晶作用の両方を伴いながら変形する。動的再結晶作用により個々の石英粒子はその粒径を減じるから、再結晶作用の進行度は定性的には石英粒子の平均粒径により表すことができる。それぞれの試料における石英粒子の平均粒径は Table 2 に示す通りである。平均粒径としては個々の粒子の粒径 $((AB)^{1/2})$ の相乗平均を用いた。Table 2 からわかるように、平均粒径の大小とファブリック・パターンには相関関係は認められない。このことは、再結晶作用によってファブリック・パターンは変化しないことを示す。

また、再結晶の進行したものと、そうでないものでは一見した微細構造が大きく異なる。したがって、微細構造を詳細に検討する場合には、再結晶の進行度が同じ程度のもの同士を選んで、比較する必要がある。そこで、ここでは再結晶作用の進行度を石英粒子の平均粒径の頻度分布パターンを指標として表した。実際、再結晶作用の進行に伴い、粒径の頻度分布パターンは変化することが知られている (FREEMAN, 1984)。Fig. 15 に石英c軸ファブリック・パターンの異なる試料からそれぞれ同様の粒径分布パターンをもつものを選びだしたものを示す。この図では粒径の測定方法の違いによる影響を小さくするために、それぞれの粒径に対して面積分率

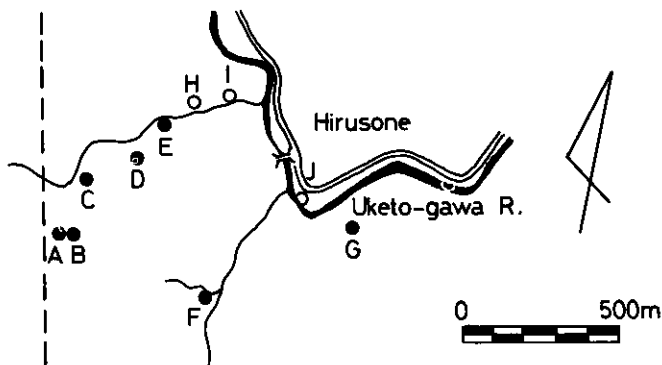


Fig. 14 Route map showing sample localities. Closed circles show "type I crossed-girdle pattern", and open circle show variety of "type II crossed-girdle pattern". Broken line is the trace of the younger fracture zone.

sample no.	mean aspect ratio	mean diameter (μm)
A	4.29	98.4
B	3.12	48.0
C	2.66	65.2
D	2.56	36.0
E	3.07	59.3
F	3.02	64.0
G	2.86	77.3
H	2.28	52.4
I	2.36	43.0
J	2.44	70.0

Table 2 List of mean aspect ratios and mean diameters.

の頻度分布を示してある。

まず、はじめに再結晶粒子が大部分を占める試料の微細構造を比較する (Fig. 15a,c)。ファブリック・パターンが type I girdle 示す試料 B の石英粒子は伸長度が大きく、波動消光も著しい。また、その粒界は鋸歯状を呈する (plate a)。一方、Y-maximum を示す試料 I では伸長度が小さく、波動消光のあまり見られない石英粒子が多く、粒界は直線状またはゆるやかな曲線状である (plate b)。これらの粒子の平均粒径が $40\mu\text{m}$ 前後であることを除けば、前者は MASUDA & FUJIMURA (1981) の S-type に、後者は P-type に対比される。

再結晶作用があまり進んでおらず、伸長はしているものの元々が残っているの試料 F, J (Fig. 15b, d) でも、やや不明瞭ではあるが同様の傾向が認められる。軸比 (aspect ratio) の平均は type I girdle を示す試料の石英粒子の方が大きい。波状消光や粒界は粒径の大きなもの同士ではその違いは不明瞭だが、小さい粒子では type I girdle を示すものの方が Y-maximum を示すものより鋸歯状になって

いることが多い (plate c,d)。MASUDA & FUJIMURA (1981) の実験が定常状態の下で行われたのに対し、上記の試料は異進的変形の途中の段階の微細構造を呈していると考えれば、これらの試料もさらに再結晶が進むと、それぞれより明瞭な S-type, P-type を呈すると思われる。以上の試料以外でも type I girdle を示すものと Y-maximum を示すものの間には、伸長度の違い (Table 2) などに同様の関係が認められる。

3. 考 察

前述のように畑川破碎帯のマイロナイト中の石英にはファブリック・パターンと微細構造との間に一定の関係が見られる。type I girdle パターンが type II girdle パターンに比べより低温高歪速度の条件下で形成されることを考えれば、type I パターンを示す試料の微細構造が低温高歪速度型の S-type に類似し、type II パターンのバリエーションである Y-maximum パターンのそれが P-type に類似していることは極めて自然である。さらに、この関係から type I パターンから type II パターンへのファブリック遷移の起こる温度-歪速度領域が微細構造の遷移領域と近接していることが示唆される。もしファブリック・パターンが転位すべりだけで形成されるならば、このことはすべり系の CRSS の変化と微細構造の変化に対応関係があることを意味する。従来的高温高圧実験でも同様の関係が認められる。すなわち、MASUDA & FUJIMURA (1981) の S-type から P-type への遷移領域と TULLIS *et al.* (1973) の point maximum パターンから small girdle パターンの遷移領域はほぼ一致している。LISTER (1981) は TULLIS らの実験の遷移は basal <a> すべり系から prism <c> すべり系のスイッチによるとしているが、LISTER & HOBBS (1980) のシミュレーションからすると本地域の場合は rhombic すべり系の活動度も重要であろう。

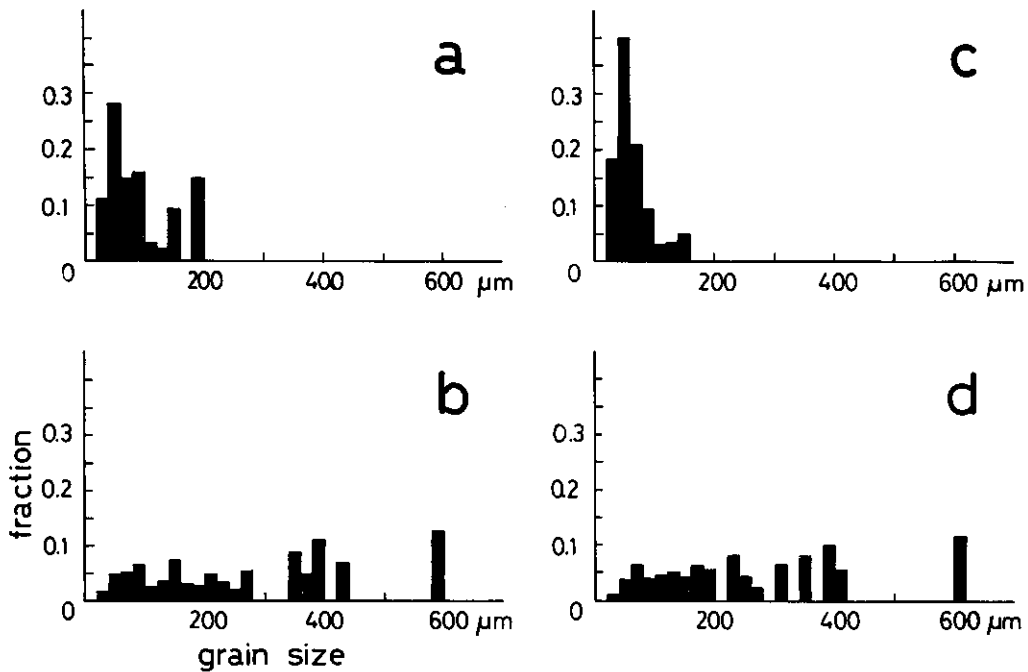


Fig. 15 Grain size vs area fraction graph. a ; sample B. b ; sample F. C ; sample I. d ; sample J. a and c consist of recrystallized grains, and b and d of both recrystallized grains and relict grains.

まとめ

畑川破碎帯のマイロナイト中の石英のc軸ファブリックおよび微細構造についてまとめると以下のようになる。

1. ファブリック・パターンには2つの型が認められる。1つは type I girdle パターンであり、もう1つは Y-maximum パターンに類似するパターンである。
2. それらのパターンは再結晶の程度に関係なく、一定のパターンを保持する。
3. type I girdle パターンを示すものの微細構造は S-type に対比され、Y-maximum パターンの場合には P-type の微細構造を呈する。

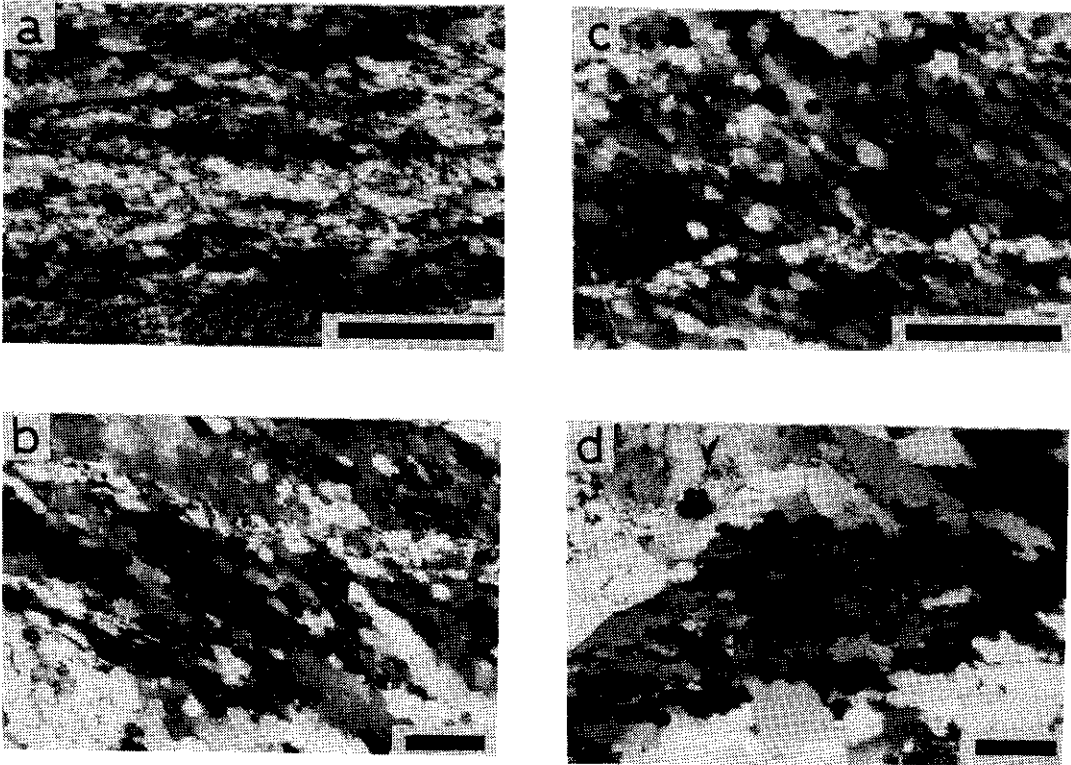
謝辞

本研究を進めるにあたり東北大学地質学古生物学教室中川久夫教授、大槻憲四郎博士には貴重な御助言を賜り、原稿をよんでいただいた。ファブリックの総括についてキール大学の竹下徹博士には有益な議論をしていただいた。また、高知大学の鈴木亮士教授には三波川帯のファブリックについて御教示をいただいた。東北大学地質学古生物学教室石井和彦博士、長浜裕幸修士には本研究全般にわたり討論していただいた。同教室石川昭夫技官、宍戸正明技官には岩石薄片を作成していただき、大友昭平技官には薄片写真の現像をしていただいた。以上の方々に厚く感謝の意を表します。

文 献

- BEHRMANN, J. H. and PLATT, J. P., 1982 : Sense of nappe emplacement from quartz c-axis fabrics ; an example from the Betic Cordilleras (Spain). *Earth and Planetary Sci. Let.*, 59, 208-215.
- BERTHÉ, D., CHOUKROUNE, P. and JEGOUZO, P., 1979 : Orthogneiss, mylonite and non-coaxial deformation of granites : the example of the South Armorican Shear Zone. *J. Struct. Geol.*, 1, 31-42.
- BLUMENFELD, P., MAINPRICE, D. and BOUCHEZ, J. L., 1986 : C-slip in quartz from subsolidus deformed granite. *Tectonophysics*, 127, 97-115.
- BOUCHEZ, J. L., 1977 : Plastic deformation of quartzite at low temperature in an area of natural strain gradient. *Tectonophysics*, 39, 25-50.
- BOUCHEZ, J. L. and PECHER, A., 1981 : The Himalayan Main Central Thrust pile and its quartz-rich tectonites in Central Nepal. *Tectonophysics*, 78, 23-50.
- BURG, J. P. and LAURENT, Ph., 1978 : Strain analysis of a shear zone in a granodiorite. *Tectonophysics*, 47, 15-42.
- CARRERAS, J., ESTRADA, A. and WHITE, S., 1977 : The effect of folding on the c-axis fabrics of a quartz mylonite. *Tectonophysics*, 39, 3-24.
- EISBACHER, G. H., 1970 : Deformation mechanics of mylonite rocks and fractured granites in Cobequid Mts., Nova Scotia, Canada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 2009-2020.
- ETCHECOPAR, A., 1977 : A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate. *Tectonophysics*, 39, 121-142.
- FREEMAN, B., 1984 : A method of quantitatively analysing dynamic recrystallization in deformed quartzitic rocks. *J. Struct. Geol.*, 6, 655-661.
- GIL SEVILLANO, J., VAN HOUTE, P. and AERNOUDT, E., 1980 : Large strain work hardening and textures. *Prog. Mater. Sci.*, 25, 69-412.
- HARA, I., TAKEDA, K. and KIMURA, T., 1973 : Preferred lattice orientation of quartz in shear deformation. *J. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, 7, 1-10.
- 唐戸俊一郎, 1986 : 地震波速度異方性のメカニズム. 唐戸俊一郎・鳥海光弘編「固体と地球のレオロジー」, 312-333.
- 越谷 信, 1985 : マイロナイトのマイクロテクスチャー. 日本地質学会第92年学術大会講演要旨. 459.
- 越谷 信, 1987 : マイロナイトの面構造の形成過程—畑川破砕帯を例として—. 日本地質学会第94年学術大会講演要旨. 469.
- KRONENBERG, A., 1981 : Quartz preferred orientation within a deformed pebble conglomerate from New Hampshire, USA. *Tectonophysics*, 79, T 7-T 15.
- LAW, R. D., 1986 : Relationship between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of plougastel, Western Brittany. *J. Struct. Geol.*, 8, 493-515.
- LAW, R. D., KNIPE, R. J. and DAYAN, H., 1984 : Strain path partitioning within thrust sheets ; microstructural and petrofabric evidence from the Moine Thrust zone at Loch Eriboll, northwest Scotland. *J. Struct. Geol.*, 6, 477-497.
- LISTER, G. S., 1977 : Discussion : Cross-girdle c-axis fabrics in quartzites plastically deformed by plane strain and progressive simple shear. *Tectonophysics*, 39, 51-54.
- LISTER, G. S., 1981 : The effect of the basal prism mechanism switch on fabric development during plastic deformation of quartzite. *J. Struct. Geol.*, 3, 67-75.
- LISTER, G. S. and DORNSIEPEN, U. F., 1982 : Fabric transition in the Saxony Granulite terrain. *J. Struct. Geol.*, 4, 81-92.
- LISTER, G. S. and HOBBS, B. E., 1980 : The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite : the influence of deformation history. *J. Struct. Geol.*, 2, 355-370.
- LISTER, G. S., PATERSON, M. S. and HOBBS, B. E., 1978 : The simulation of fabric development in plastic deformation and its application to quartzite : the model. *Tectonophysics*, 45, 107-158.

- LISTER, G. S. and SNOKE, A. W., 1984 : S-C mylonites. *J. Struct. Geol.*, 6, 617-638.
- LISTER, G. S. and WILLIAM, P. F., 1979 : Fabric development in shear zones : theoretical controls and observed phenomena. *J. Struct. Geol.*, 1, 283-297.
- MAJORIBANKS, R. W., 1976 : The relation between microfabric and strain in a progressively deformed quartzite sequence from central Australia. *Tectonophysics*, 32, 269-293.
- MASUDA, T. and FUJIMURA, A., 1981 : Microstructural development of fine grained quartz aggregates by syntectonic recrystallization. *Tectonophysics*, 72, 105-128.
- MILLER, D. M. and CHRISTIE, J. M., 1981 : Comparison of quartz microfabric with strain in recrystallized quartzite. *J. Struct. Geol.*, 3, 129-141.
- PRICE, G. P., 1985 : Preferred orientation in Quartzites. In WENK, H. R. ed., *Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks : An Introduction to Modern Texture Analysis*. Academic Press, Inc, London, 385-406.
- SANDER, B., 1911 : Über Zusammenhänge zwischen Teilbewegung und Gefüge in Gesteinen. *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.* 30, 381-384.
- SUZUKI, T., 1970 : Röntgenographische Gefügeanalyse (mit dem Zählrohr-textur-goniometer) von Quarzschiefern aus Zentral-Shikoku, Japan. In PAULISCH, P. ed., *Experimentelle und natürliche Gesteinsverformung*. Springer-Verlag, 1-18.
- 鈴木堯士・刈谷哲也・坂本大介, 1987 : X線による石英ゲフェューゲから予測される白滝地域の地質構造. 日本地質学会第94年学術大会講演要旨, 362.
- 鈴木堯士・刈谷哲也・谷田 滋・広部安之, 1986 : 四国中央部三波川帯の珩質片岩ファブリックからみた大構造解析. 日本地質学会第93年学術大会講演要旨, 375.
- SYLVESTER, A. G. and CHRISTIE, J. M., 1968 : The origin of cross girdle orientations of optic axes in deformed quartzites. *J. Geol.*, 76, 571-580.
- 竹下 徹, 1986 : 石英多結晶の異方的塑性流動. 唐戸俊一郎・鳥海光弘編「固体と地球のレオロジー」, 219-238.
- TAKESHITA, T., 1987 : Plastic anisotropy in textured mineral aggregates : Theories and geological implications. In KARATO, S. and TORIUMI, M. eds., *Rheology of Solids and of the Earth*. Oxford Univ. Press, London, in press.
- TULLIS, J., 1977 : Preferred orientation of quartz produced by slip during plane strain. *Tectonophysics*, 39, 87-102.
- TULLIS, J., CHRISTIE, J. M. and GRIGGS, D. T., 1973 : Microstructures and preferred orientations of experimentally deformed quartzites. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84, 297-314.
- TURNER, F. J. and WEISS, L. E., 1963 : *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*. McGraw-Hill Book Co. Inc. 545p.
- WHITE, S. H., BURROWS, S. E., CARRERAS, J., SHAW, N. D. and HUMPHREYS, F. J., 1980 : On mylonites in ductile shear zone. *J. Struct. Geol.*, 2, 175-187.
- WILSON, C. J. L., 1975 : Preferred orientation in quartz ribbon mylonite. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, 968-974.



Explanation of Plate

- a ; Microphotograph of sample B, showing S-type microstructure.
- b ; Microphotograph of sample F. Recrystallized quartz grains are elongated and their grain-boundaries are serrated.
- c ; Microphotograph of sample I, showing P-type microstructure.
- d ; Microphotograph of sample J. Recrystallized quartz grains are less elongated than sample F.

All photographs, taken between crossed polarizers, are of the sections parallel to mylonitic lineation (Lm) and normal to mylonitic foliation. The horizontal sides of photographs are parallel to Lm. Scale bars represent 0.2mm.