

つくば技術開発センター1350mボーリングコアの地質学 (4)  
 —— 花崗岩中の脆性断層の微細機構 ——

齋藤拓哉・三本健四郎・山根 誠・岡野 肇・吉田 浩・妹尾洋一・原 郁夫

Geology of the 1350m boring cores from the OYO CORPORATION  
 TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER (4)  
 —— Micromechanism of brittle faulting in granite ——

Takuya Saito, Kenshiro Mimoto, Makoto Yamane, Hajime Okano,  
 Yutaka Yoshida, Youichi Seo and Ikuo Hara

**Abstract**

In a massive leucogranite core from 718.6m depth of the 1350m Boring drilled in the OYO CORPORATION TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER, Tsukuba, Japan are found microfaults of conjugate sets produced under low-temperature condition, where calcite, white flaky minerals and chlorite crystallized. Quartz and feldspar grains along those microfaults are only weakly deformed, showing their microtextures produced during the earlier phase of faulting.

Main deformation mechanism of feldspar related to faulting is formation of R1, P and Y shear planes as cleavage-controlled cracks. In some grains are found only R1 cracks along cleavage, and through-going faults appear from zones where elongate feldspar grains separated by R1 cracks are rotated and strongly fragmented producing submicron gouge particles. This is a formation mechanism of faults with non-rational crystallographic orientation and oblique to cleavage. In margin of fault zones is observed folding of cleavage and twin planes of feldspar. Undulatory extinction zones in feldspar are also sometimes found in lateral extension of fault zones. Some of them are of conjugate sets. The undulatory extinction zones appear to be produced in feldspar grains unfavourably oriented to formation of cleavage- and twin-controlled cracks within protoshear zone. Formation mechanism of such undulatory extinction zones in feldspar is not clear.

One of main deformation mechanisms of quartz related to faulting is derived from formation of R1, R2 and P shear cracks. Quartz is highly cataclastically deformed in overlap zones of en echelon R1 shear cracks as high strain zones, forming fine-grained quartz aggregates. The aggregates are linked with each other by P shear cracks in the center of protoshear zone, giving rise to through-going fault. In the other case, pre-existing healed cracks in quartz are reactivated within protoshear zone related to faulting, forming closely spaced shear cracks in single set. Through-going faults appear from zones where elongate quartz grains separated by such the shear cracks are rotated and strongly fragmented, like the case of feldspar. Undulatory extinction zones of conjugate sets in quartz, which are always associated with shear cracks along their zone boundaries, are sometimes found in lateral extension of fault zones, though their formation mechanism is not clear.

**(要 旨)**

応用地質つくば技術開発センターで掘削された1350mボーリングの718.6m深度で採集された塊状で優白質な花崗岩コアには、方解石、白色葉片状鉱物、緑泥石が結晶する低温条件下で形成された共役微小断層が発達する。この断層における石英、長石の変形は弱く初期的変形構造が良く観察される。

断層における長石の変形の主要な機構は、へき開、双晶に規制されたクラックによる、R1, P, Y 剪断面の形成である。粒によっては、R1 剪断面のみが形成されている。このR1クラックの形成から、through-going faultへの成長は、R1クラックによって分離された伸長長石片の回転と破碎、超微細粒子の形成によって起こっている。これが、へき開に斜交し特定の結晶学的方位をもたない断層の一つの形成機構である。断層の周辺では、へき開、双晶の引きずり褶曲

が形成されている。長石の波動消光帯が断層の延長上に形成されていることがある。共役的な波動消光帯も認められる。このような波動消光帯は、プロトシアゾン内において、へき開、双晶に規制されたクラックの形成に適していない配置の結晶粒の変形機構であるように見えるが、このような波動消光帯の形成機構は明らかでない。

石英の主要な変形機構の1つは、R1, R2, P 剪断面の形成を通して進行する現象である。プロトシアゾン内部の雁行状に配列するR1シアクラックのオーバーラップ部の高歪み帯に出現する石英の破碎細粒化部が、Pシアクラックを媒介として連結し、through-going faultが形成される。いまひとつ変形機構は、プロトシアゾン内部の顕著な既存のヒールド・クラックは、1セットのシアクラックとして再活動し、このシアクラックによって分離され伸長した石英片が回転する。大きな変形量のもとではその過程で石英片の破碎細粒化が起こり、through-going faultの形成へと進行するものである。プロトシアゾンに沿った波動消光帯と帯境界に沿ったシアクラックが形成されている場合がある、この波動消光帯の起源は明らかでない。

キーワード：微小断層、石英、長石、変形機構、低温条件

## 1. 緒言

つくば技術開発センターで掘削した1350mボーリング(図-1)の718.6m深度に分布する領家帯花崗岩は、優白質な黒雲母花崗岩である。この花崗岩には、三本ほか(2000)<sup>1)</sup>が、1350mボーリングの621.5m以深に分布する領家花崗岩類・変成岩類の変形構造解析によって、剪断帯-5時相とした時相の変形作用によって形成された微小断層群が発達する。本報告では、718.6m深度コアに見られるこの微小断層群が、詳細に検討記載される。報告の目的の1つは、コア試料において観察される断層現象による石英、長石の変形機構とその変形構造を詳細に記載し後の研究資料として残すことである。いま1つの目的は花崗岩の断層現象の微細機構の理解に資することにある。

剪断帯-5時相は、方解石、白色葉片状鉱物、緑泥石が結晶する低温条件下での変形時相である(三本ほか, 2000<sup>1)</sup>)。沸石の晶出は認められていない。かつてEvans(1988)<sup>2)</sup>は、これに比較される低温条件下で変形した花崗岩中の石英と長石の変形機構および観察される変形構造に焦点をあてた研究がほとんどないことを指摘したのであるが、今日においてもなお多様な情報の収集が期待されているところである。この低温条件下での花崗岩を構成する鉱物の変形に関わる研究は、地殻内部の脆性-塑性漸移帯(=base of seismogenic zone)における花崗岩の断層現象の微細機構の理解につながる可能性があり極めて重要である。本報告が記載する花崗岩中の断層群では、変位量が極めて小さいため、断層現象において、長石と石英が受ける変形作用の初期的な構造が良く観察される。このため、断層現象の理解につながる重要な情報が示されるものと考えられる。

## 2. 718.6m深度コアの花崗岩に見られる微小断層

### 2.1 微小断層の配列様式

718.6m深度コアを構成する岩石は花崗岩である。石英・斜長石・カリ長石・黒雲母で構成され塊状である。

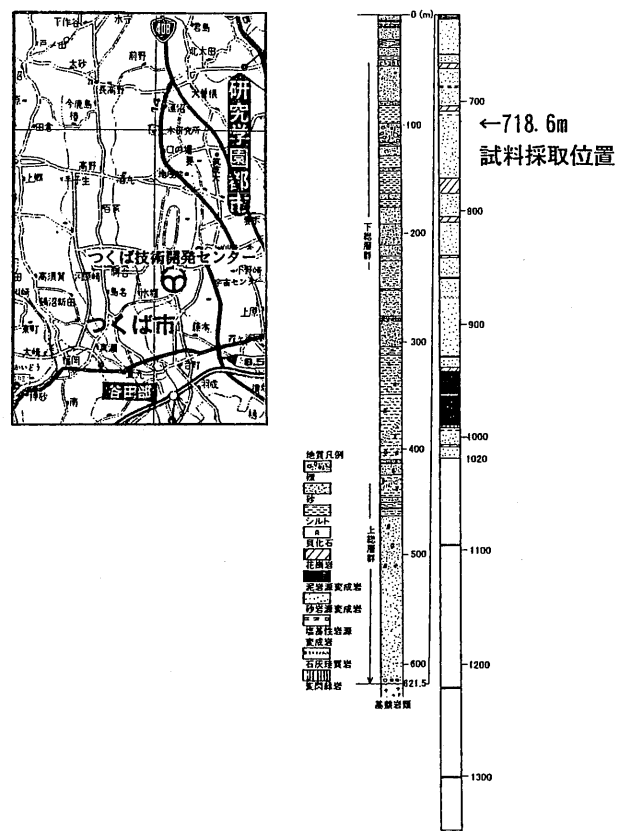


図-1 つくば1350mボーリングの位置とボーリング柱状図。この報告で記載されている試料の採集位置

Fig.1 Locality of the Tsukuba 1350m Borehole and geological columnar section of the boring, showing the locality of the specimen described in this paper.

黒雲母のモード値が2%に満たない優白質花崗岩である(図版-1)。

コア軸に垂直な切断面に、ほぼ平行に走るクラック様の微細構造が観察される。この微細構造のトレンドに直交しコア軸に平行な大型薄片を作成し、肉眼でクラック様に見える微細構造を、20~200倍の倍率で顕微鏡観察を行なった。その結果、肉眼でクラック様に見える微

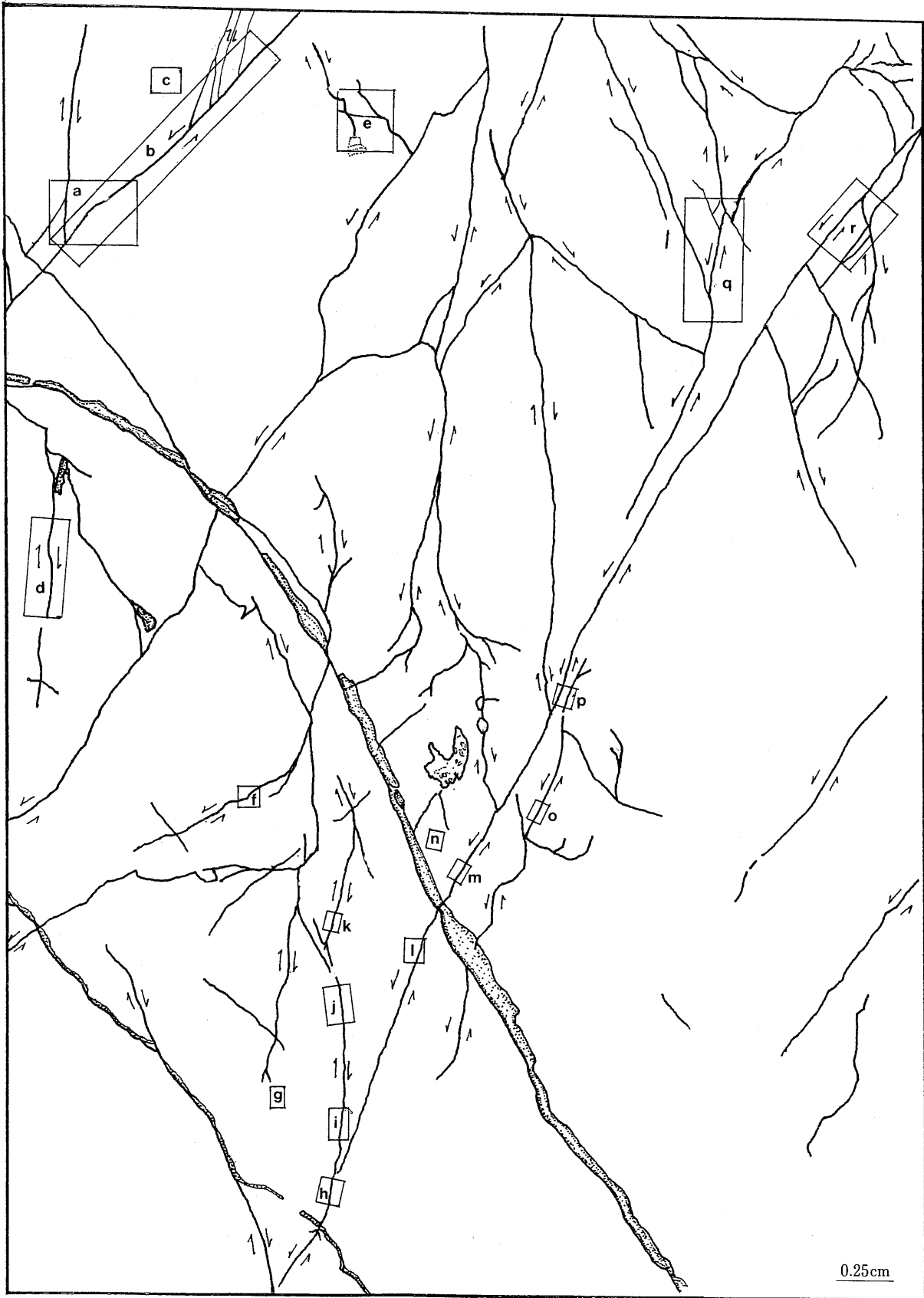


図-2 718.6m深度の優白質花崗岩コアの薄片(図版-1)における断層分布。薄片は断層の交線に垂直。矢印：剪断センス，  
a～r：顕微鏡写真の位置，点々の領域：方解石脈

Fig.2 Distribution of faults in the thin section (Plate-1) of leucogranite core from 718.6m depth. The thin section is normal to the intersection line of faults. Arrows: shear sense, a～r: localities of microphotographs shown in this paper, stippled area: calcite veins.

細構造は、後頁で解析されるように、共役的な微小断層であることが明らかとなった。薄片の作成方位からすれば、薄片では、これら断層群の多くについてのクロスセクションが観察されるものと考えられる。図版-1が薄片の顕微鏡写真である。この薄片中における断層の分布位置を示したのが、図-2である。

薄片で観察される構造が、共役的な微小断層群のクロスセクションであるとすれば、それらのなす平均的な角度は薄片から測定される。図-3が測定結果のローズ図である。図は、コア軸(=薄片の長軸)に垂直な線を引き、その線と断層の交点で断層の方位を測定して作成したものである。断層群の方位は、分散は大きいがバイモーダル分布である。右側のクラスターの中心と左側のクラスターとのなす角は、約45°である。その鋭角2等分線はほぼコア軸に平行である。

図-2には、断層に沿った微細構造(例、図版-2)から、可能な限り各断層について剪断センスを決定して示している。図-3の右側のクラスターに属する断層のほとんどが左横ずれの剪断センスを示し、左側のクラスターに属する断層のほとんどが、右横ずれの剪断セン

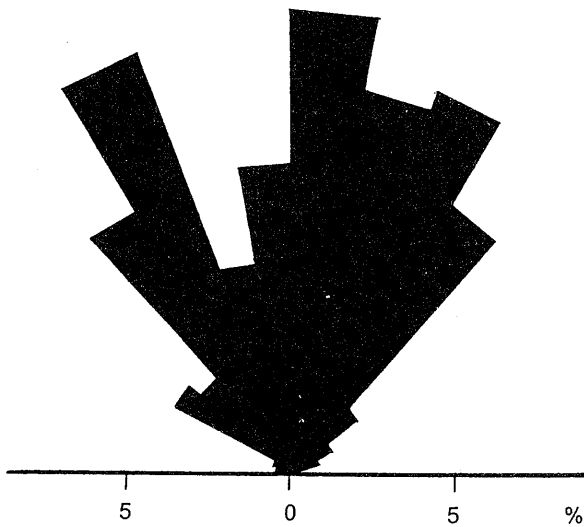


図-3 718.6m深度の優白質花崗岩コアの薄片(図版-1)中の断層のローズ図

Fig.3 Rose diagram for faults in the thin section (Plate-1) of leucogranite core from 718.6m depth.

スを示している。この解析結果(図-2と3)によれば、微小断層群は、ほぼコア軸に沿った方向からの圧縮応力の作用によって形成されたものと判断される。

## 2.2 断層の微細構造

図-2の断層群が長石、石英、黒雲母を横断して発達するところで、これらの鉱物が、どのように変形しているかを次に検討する。変形様式の特徴を明らかにするために、図-2のa~rまでの領域で見られる変形構造を代表例として記載検討する。

### 2.2.1 長石に見られる変形微細構造

図-2の領域aとbの顕微鏡写真とスケッチ(図版-2, 3)によって、まず、本試料に発達する長石を切断する断層の2つの例を説明しよう。図版-2には、共役断層系を構成する2つの断層セットが認められる。左側の断層セットは鉱物粒を切断し、断層に沿った変位は、右横ずれセンスで、長石粒aと長石粒bの変位から明瞭である。断層はへき開に沿って発達し、シャープで直線に近いクラックのように見えるが、それに沿って顕微鏡下では識別不可能な微細鉱物粒(submicron gouge particles)からなるガウジが、極めて幅狭く観察される。

これに対して、図版-2の右側の断層セットは、0.2mmを越える幅をもつ剪断帯である(図版-3)。この断層のほとんどの部分は、鉱物粒界に沿っている。粒界に沿った滑りが、周囲の鉱物粒内部に変形を伴う様に起こっている(図版-2, 3)。内部変形の広がりから剪断帯の幅が読み取れる。剪断帯の中心には、狭いスペーシングで雁行状に極めてシャープで微小な断層群が発達する(図版-2, 3)。この微小断層に沿った滑りによって、長石のへき開面や双晶面の左横ずれセンスの引きずり褶曲が形成されている(図版-3)。へき開面や双晶面の褶曲は、この断層の過程に、長石がへき開面や双晶面に沿った滑りにより変形したことを示している。微小断層群に挟まれた長石結晶の内部にも、へき開クラック(cleavage crack)に沿う滑りが認められる(図版-3b)。

図版-3の剪断帯内の微小断層群の方位を測定した結果が図-4である。図は剪断帯のトレンドに平行~低角度をなすものが殆どであることを示している。しかし、

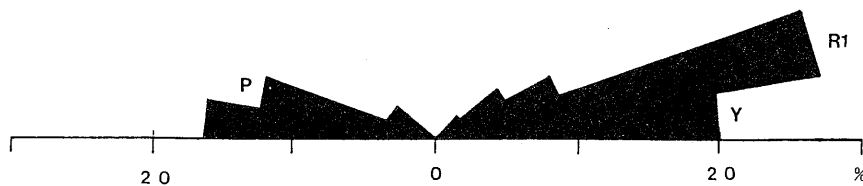


図-4 図版-3 b中の左横ずれ断層群のローズ図。R1, P, Y: R1, P, Y剪断面に相当する断層群の卓越方位

Fig.4 Rose diagram of faults in Plate-3 b. R1, P and Y: dominant orientation direction of faults corresponding to R1, P and Y shear planes respectively.

これらの断層群の主体は、図版-2と3に明瞭に示されているように、3つのセットに区分出来る。即ち、これらの微小断層群は、剪断帯のトレンドとの配置から見ると、剪断帯で良く知られているR1, P, Y (e.g. Skempton, 1966<sup>3)</sup>; Tchalenko, 1970<sup>4)</sup>; Logan et al., 1979<sup>5)</sup>; 原, 1998<sup>6)</sup> 参照) に比較される断層群である。

本試料では、領域aとbにおけると同様に、微小断層は、カリ長石と斜長石を通して連続するように発達している。このことは、図-2の領域kを通る右横ずれセンスの断層においても観察される。図版-4aとbが、領域kの顕微鏡写真である。図版-4aでは、1つの斜長石粒を2つのカリ長石粒が取り巻いている。これらの鉱物粒を横断して、3つの平行な微小断層が発達している。2つのカリ長石粒の結晶学的方位は異なっており、写真では消光位の相違として現れている。この微小断層は、斜長石のアルバイト双晶に低角度で斜交している。

図版-4aの3つの平行な微小断層に沿って、極めて微細な幅で微小鉱物粒が形成されている。この3つの断層の内側に、雁行状の付随微小断層群が発達する。この付随微小断層は、斜長石ではアルバイト双晶に沿っている。そして、この断層現象に伴ってアルバイト双晶の褶曲が形成されている(図版-4b)。この褶曲の非対称性は、付随断層に沿った滑りが右横ずれであることを示唆するが、この事実から雁行状の付随微小断層群はR1と見做される。R1断層に伴う長石の変形は、また微細鉱物集合帯と波動消光を伴うものである。

図版-4cは領域d(図-2)を通る断層の顕微鏡写真である。断層は黒雲母、カリ長石、斜長石を横断している。断層に沿う右横ずれ変位は斜長石で明瞭である。黒雲母では右横ずれセンスの微小キックの形成として認められる。斜長石を切断する断層は、カリ長石において分岐している。斜長石からまっすぐ続く断層は、カリ長石のへき開に沿って発達している。そして、黒雲母のキック帯に連続している。このキック帯は、左側のカリ長石では、波動消光帯となっている。斜長石から左下へ分岐する断層は、へき開に低角度で斜交して発達するが、黒雲母に入って形成されるキック帯は微弱であり、黒雲母を横断しない。この分岐断層から分岐して、いまひとつの断層が、カリ長石のへき開に沿って発達している。この断層から続く黒雲母のキック帯は、その左側のカリ長石では、へき開に沿った断層となっている。領域dでの断層に伴う長石の変形は、へき開に沿うところでも、へき開に低角度で斜交するところでも、微細鉱物集合帯と波動消光帯を伴うものである。

カリ長石を横断する断層(through-going fault)が、へき開に沿ったクラックの形成を媒介して発生している場合がある。図版-5aは領域m(図-2)からの例である。へき開に沿ったクラックは、断層に沿った狭い帯に集中して発達している。このようなクラックの分布域は剪断帯の広がりに対応する。スペーシングは断層の中心に向かって小さくなっている。このクラックで分断さ

れた細長い長石片は、破断によって折れ曲がり、剪断帯の中心で微細長石片の集合帯を形成している。微細長石片は破断によって形成されており、その集合帯が断層(through-going fault)である。細長い長石片の折れ曲がり、剪断帯に沿った剪断センスを反映した引きずり褶曲である。図版-5aの断層から、へき開に斜交するトレンドを持つ断層の起源と断層に沿った微細長石片集合帯の形成機構の1例が読み取れる。

図版-5bは、領域j(図-2)を通るカリ長石を横断する断層が、2方向のクラックの形成を通して発生したことを示している。1つのクラックは断層に沿っており、いまひとつは断層に低角度をなし雁行状に配列する狭いスペーシングのクラックである。雁行状クラックと断層に沿ったクラックに、微細鉱物集合帯が幅狭く形成されている。領域jを通る断層の剪断センスとの対応で見ると、雁行状クラックはR1クラック、断層に沿ったクラックはYクラックに相当する。同じような例が領域iと領域hに見られ、図版-6に示されている。図版-6bでは、剪断歪みが大きく、雁行状R1クラックで分断された長石片が、破断によって折れ曲がり、更に破碎し微細長石片集合帯に変化している。

図版-7aは領域r(図-2)における斜長石を横断する2本の断層の顕微鏡写真である。断層は、アルバイト双晶に高角度をなすへき開に沿って発達しており、微細鉱物集合帯が幅狭く形成されている。この断層に低角度で斜交する雁行状微小断層群は、図版-7bの拡大写真から読み取れるように、母晶とは異なる格子方位をもつ波動消光帯であり、その中に更に微細な粒状の波動消光体が形成されている。

領域n(図-2)でも図版-7bの波動消光帯に比較される構造が観察される。この構造は図版-8aとbに示されている。両者は同一の結晶内において共役的な関係をもって発達する。図版-8aでは波動消光帯の特徴が明瞭であるが、図版-8bでは微細な粒状の波動消光体が配列する帯としての特徴が明瞭である。この粒状の波動消光体では、境界はシャープであり、個々の粒状体内部での波動消光も極めて微弱である。動的再結晶粒のようにも見える構造である。

図版-8cは、領域o(図-2)において斜長石を横断する断層の顕微鏡写真である。この断層に沿った狭い帯に、白色葉片状鉱物を伴う狭いスペーシングのR1配置のシアクラックが雁行状に発達する。白色葉片状鉱物の形成は、シアクラックに沿った流体の通過を媒介とした長石の変質を示すものである。このシアクラックによって分離され伸長した長石片がキック様に曲がる帯(波動消光帯)が発達する。このキック様の帯の中で斜長石の細粒化が起こっている。細粒化は、キック様の帯のトレンドに低角度で斜交する微細破碎帯を形成するように起こっている。この微細破碎帯周辺における斜長石片の回転センスは、キック様の帯に見られるセンスに一致している。

2.2.2 石英に見られる変形微細構造

断層に沿っての石英の変形様式には、4つの型が識別される。そのひとつは、断層が、そのトレンドに斜交し雁行状に配列する狭いスペーシングのクラックが発達する狭い帯として規定される型である。図版-9c, 図版-7c, 図版-10aがその例である。

図版-9cは、領域q(図-2)を通る断層で観察される例の顕微鏡写真である。ここで、断層は、単一の石英粒中に共役的な2つのセットとして発達する。1つのセットは、母晶石英を横断する微細なヒールド・クラックにほぼ沿うように発達する。図版の点Aと点Bのセットがそれである。この共役的な断層は、母晶とは格子方位が僅かに異なる、したがって消光位が僅かに異なる帯として認められる(図版-9c)。この関係は、図-5には、結晶軸cの方位変化として示されている。図から、同じセットに属する点Aと点Bの帯では右横ずれセンス、これらとは異なる点Cの帯では左横ずれセンスの格子回転が読み取れる。この事実は、共役断層の鋭角2等分線方向に圧縮軸があることを示唆するものであるが、それは、図-2の断層群の形成に関わる圧縮応力の作用方向に一致している。

図版-9cにおいて消光位の異なる帯として規定された石英中の断層には、図版に見られるように、雁行状に配列する狭いスペーシングのクラック群が発達している。このクラック群は、点Cの帯では、帯に高角度であり、点Aの帯では帯に低角度である。このクラック群は母晶のヒールド・クラックから僅かにずれた方位をもって発

達する。母晶のヒールド・クラックの方位に対する帯内のクラックの方位の回転センスと回転角は、c軸の回転センスと回転角(図-5)にはほぼ一致している。このことは、母晶のヒールド・クラックは、断層帯においてシアクラックとして滑り回転しながらより顕著に再成されたことを示すもののように見える。クラック及び格子方位の回転角から、点Aと点Cの断層は、歪み量の小さな変形であると言える。

図版-7cと図版-10aは、図版-9cの点Cの断層に比較される特徴をもつ石英の変形様式を示すものである。クラックで分離され伸長した形態をもつ石英片の形態配列は明瞭である。図-7cの例では、石英片の形態配列の方位は母晶のクラックの方位から中程度の角度でずれている。

図版-10aの例では、現象はやや複雑に見える。断層帯中における細粒石英片の形態定向配列の方位は、帯の左側と右側で全く逆向きとなっている。しかし、いずれも母晶のヒールド・クラックのトレンドに近いが僅かにそれとはずれた方位を示すという関係にある。方位のずれを、母晶のヒールド・クラックの方位からの回転センスと見ると、回転センスは帯を通して一定で左横ずれである。断層帯内の伸長した石英片の形態を支配するクラックは、母晶のヒールド・クラックと同じ起源のものであると言える。

上記の例と同様の起源を持つクラックで分離され伸長した形態をもつ石英片が、大きな剪断変形により更に細粒化しながら形成した組織が、図版-9dに示されている。この図版は、領域pを通る断層の顕微鏡写真である。

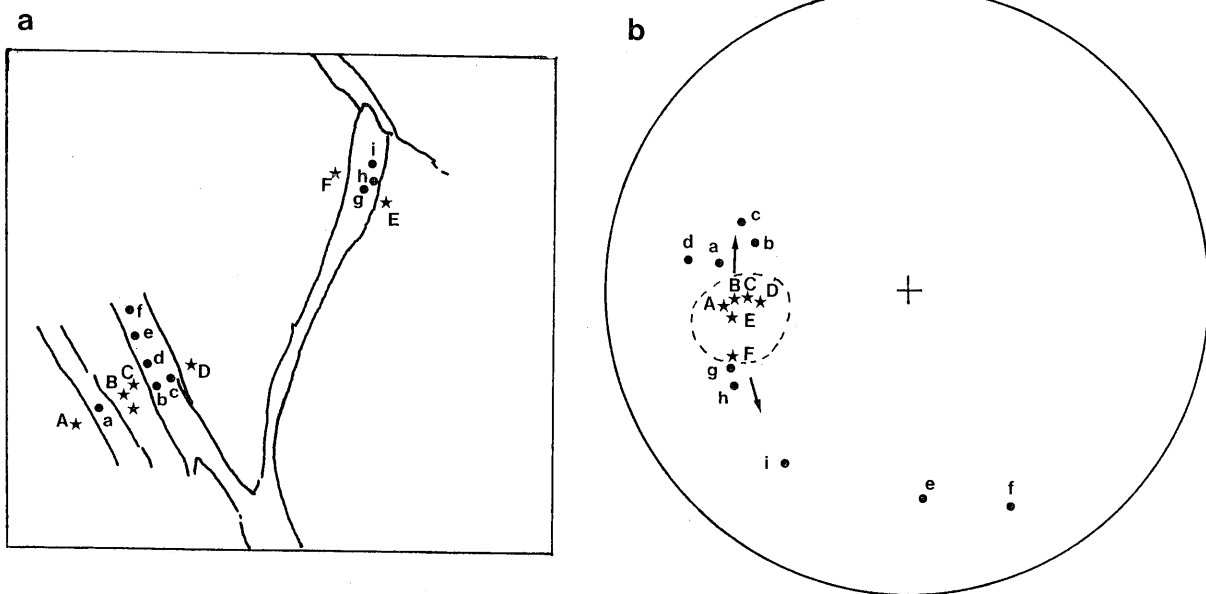


図-5 図版-9cの石英中の共役断層のスケッチ(a)と断層の中とその母晶の石英のc軸ファブリック(b)。A~F:断層の母晶石英のc軸ファブリックが解析された位置, a~i:断層中の石英のc軸ファブリックが解析された位置  
 Fig.5 Sketch of conjugate faults in quartz of Plate-9c (a) and c-axis fabrics of quartz in and just around the faults(b). A~F: positions where the c-axis fabric of quartz just around the faults has been analyzed. a~i: positions where the c-axis fabric of quartz in the faults has been analyzed.

ここでは、石英の破砕片は、断層帯内における不均質剪断を反映して、最も細粒化が進んだ剪断センターを中心とするシグモイダルな形態配列を示している。このシグモイダルな形態配列と対応する格子方位の回転が認められる(図-6)。破砕片の形態と格子方位の回転センスは、領域Pを通る断層の剪断センスに一致している。したがって、断層帯中の伸長した石英片の形態を支配するクラックは、母晶のヒールド・クラックと同じ起源のものであり、格子方位の回転は、石英片の回転によってもたらされたものとみなすことが出来る。

石英の変形様式のいまひとつの型は、図版-9 a と b (図-2の領域g と c) に見られる共役的な波動消光帯である。格子方位の回転センスからすれば、これらの波動消光帯は、その鋭角2等分線方向が、圧縮応力の作用方向となる剪断帯である。この圧縮応力の作用方向は、図-2の断層群の形成に関わる圧縮応力の作用方向に一致している。これらの波動消光帯は、図版-9 cの共役的な波動消光帯に似ているが、後者では帯内に雁行状のクラック群が発達し、先に述べたようにこのクラックで分離した石英片の回転により波動消光帯が発生している。このような雁行状のクラック群は、図版-9 a と bの波動消光帯では、顕微鏡で観察した限りでは認められない。この波動消光帯の幅は不規則に変化する。帯境界に沿ってクラックが発達するが、帯が狭くなって帯境界が合体し1つのクラックのみとなっているところがある。このような帯境界のクラックには、大きく消光位の異なる細

粒石英の形成が特徴的である。帯境界クラックはシアクラックなのであろう。波動消光帯(=帯境界のクラック)にはまた、ところどころで、そのトレンドにシャープな屈折が認められる。圧縮応力の作用方向に低角度をなすトレンドと、中角度をなすトレンドの連結による屈折である。波動消光帯はまた、交差部では幅広くなり、多様な消光位をもつ多数の石英片の集合体となっている。このような組織の特徴は、共役的プロトシアゾーンに沿ってのクラックの連結-成長を通して、波動消光帯が形成されたことを示唆しているように見えるが、形成機構の詳細は不明である。

断層を通る位置での石英の変形様式のいまひとつの型は、領域f(図-2)で見られるものである。図版-10 bがその顕微鏡写真である。領域fを通る断層の剪断センスは左横ずれである。図版に見られるように、断層のトレンドに低角度をなして雁行状のクラック(図版中のR1)が発達する。このR1クラックは、断層のトレンドに沿った限られた帯内でのみ発達する。この帯の中央には、細粒石英集合体が矩形状形態をもって発達するが、矩形状細粒石英集合体の2辺がR1クラックであり、2つのR1クラックがオーバーラップする位置で発達している。矩形状細粒石英集合体の他の2辺は、断層のトレンドに低角度をなす、いまひとつのクラック群(図版中のP)である。

領域fを通る断層の剪断センスは、左横ずれであることから、R1クラックは剪断帯のR1シアクラックに相

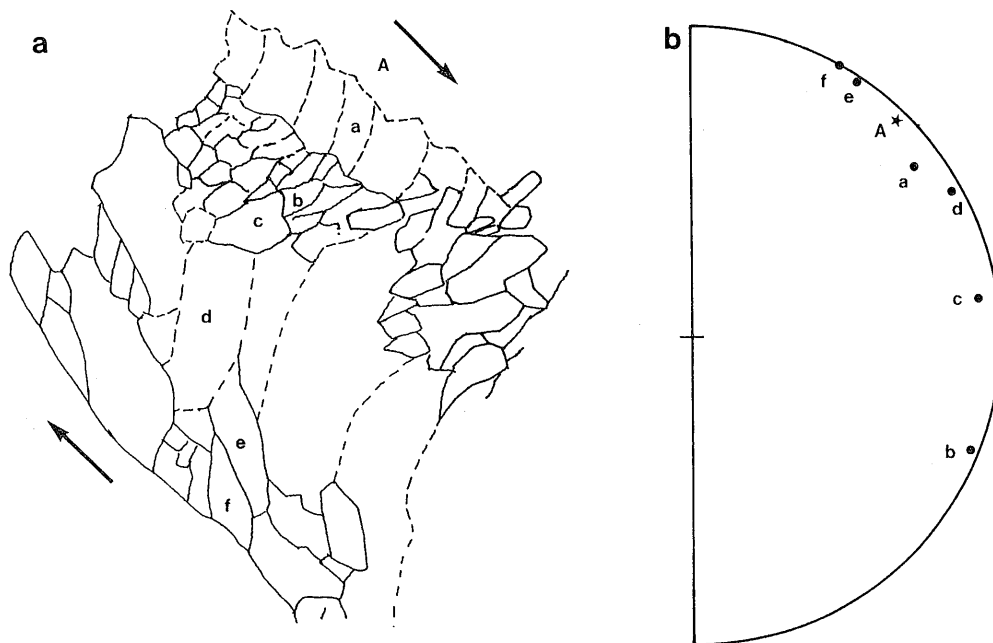


図-6 図版-9 dの石英中の断層のスケッチ(a)と断層の中とその母晶の石英のc軸ファブリック(b)。A: 断層の母晶石英のc軸ファブリックが解析された位置, a~f: 断層中の石英のc軸ファブリックが解析された位置, 矢印: 断層の剪断センス

Fig.6 Sketch of fault in quartz of Plate-9 d (a) and c-axis of quartz in and just around the fault (b). A: position where the c-axis fabric of quartz just around the fault has been measured. a~f: positions where the c-axis fabric of quartz in the fault has been analyzed. Arrows: shear sense along the fault.

当し、そのオーバーラップ部の歪み集中帯に、細粒石英集合体が形成されたものと判断される。そして、矩形細粒石英集合体の外壁を形成するいまひとつのPクラックは、剪断帯のPシアクラックに相当するよう見える。断層の中心における矩形細粒石英集合体のステップ状分布は、R1クラックの雁行状発達によるオーバーラッ

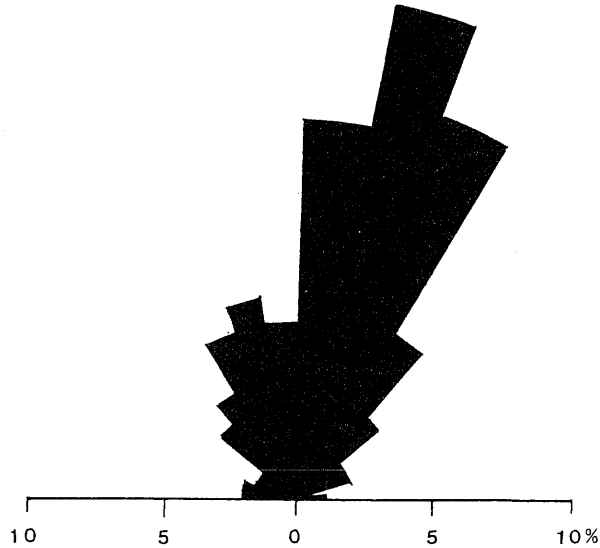


図-7 図版-11の領域とその周囲の石英中のヒールド・クラックのローズ図。

Fig.7 Rose diagram for healed cracks of quartz in and just around area of Plate-11.

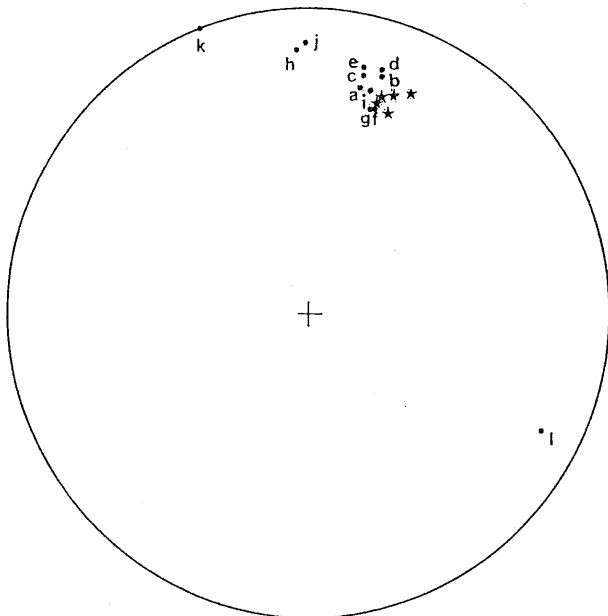


図-8 図版-11 cの石英中の断層の中とその母晶の石英のc軸ファブリック。星印：断層の母晶石英のc軸ファブリック、a~l：断層中の石英のc軸ファブリック。詳細は本文。

Fig.8 c-axis fabrics of quartz in and just around fault of Plate-11c. Solid stars: c-axis fabric of quartz just around the fault. a~l: c-axis fabric of quartz in the fault. For fuller explanation see the Text.

プ部のステップを反映したものである。

図版-11は、領域e(図-2)における石英の変形様式を示す顕微鏡写真である。石英には共役的な関係をもって配列するシャープなヒールド・クラックが発達する。その鋭角2等分線方向は、図-2の断層群の形成に関わる圧縮応力の作用方向と一致する。系を構成する2つのセットのうち、図版の右上から左下へと走るヒールド・クラックが卓越している。図-7は、領域eとその周辺に分布する石英粒に見られるヒールド・クラックの配列方位の測定結果である。図版-11に見られるヒールド・クラックの配列パターンに対応する特徴を示している。

領域eでの石英の細粒化は、この領域を2列の微弱な平行断層とそれらを繋ぐ断層の発達を示唆する(図版-11a)。しかし、細粒化はヒールド・クラックに規制されてパッチ状に起こっている。パッチは、断層のトレンドに沿うのではなく、むしろ圧縮応力の作用方向に高角度に斜交し断層とは逆の剪断センスが働くようなR2方向に伸びるように発達している(図版-11b)。このことを反映して、パッチとその周辺の石英片のc軸の方位は、母晶のそれから左横ずれセンス——断層の剪断センスとは逆——の回転を示している(図-8)。

### 3. 考察と結論

上記の解析結果から、本試料において観察される断層の形成に関わる長石の変形様式として次のような諸点が指摘出来る。

- 長石の主要な変形機構は、へき開、双晶に沿ったシアクラックの形成である。
- シアクラックに沿って、しばしば、微細結晶集合体(submicron gouge)が形成されている。
- シアクラックは、しばしば、剪断帯のR1面、P面、Y面相当の方位のすべり系を形成して発達する。
- R1シアクラックによって、分離され伸長した長石片は、剪断センターにおいて破碎しながら、引きずり褶曲を形成する。
- 剪断センターにおける長石片の破碎を通してthrough-going faultが形成される。
- R1, P, Y相当クラック群の発生する剪断帯の周辺で、斜長石のアルバイト双晶の引きずり褶曲、カリ長石のへき開の引きずり褶曲が発達する。
- R1シアが、双晶に沿って起こっているところで、アルバイト双晶面が非対称微小褶曲を形成していることがある。
- 断層が、長石のへき開、アルバイト双晶に斜交して通るところでは、断層のトレンドに沿った波動消光帯が形成され、波動消光帯の内部には帯を横断する粒状の小さな波動消光体が形成されている。
- 長石の変形様式には、圧縮応力の作用方向に対する長石の格子方位の差が関わっており、それによって変化している。

本試料の断層群の形成は、方解石、白色葉片状鉱物、



緑泥石が結晶する低温条件下での現象である。長石の変形の主要な機構は、へき開、双晶に規制されたクラックの形成である。250~350°C以下の低温条件下での長石の変形が、クラックによるものであり、クラックがアルバイト双晶、へき開に規制され発達することは、Borg and Handin(1966)<sup>7)</sup>、Tullis and Yund (1977<sup>9)</sup>、1987<sup>9)</sup>、Marshall and McLaren (1977)<sup>10)</sup>、Mitra(1978)<sup>11)</sup>、Mitra and Frost(1981)<sup>12)</sup>、Hadizadeh and Tullis (1992)<sup>12)</sup>等多くの研究者によって確認されてきたことである。本試料では、へき開、双晶が応力の作用方向に対して、適当な配置にあるところでは、このようなへき開支配クラック (cleavage-controlled cracks) は、R1、P、Y相当の剪断面として滑動している。滑動可能なへき開がR1方向にのみ配置しているところでは、このクラックの形成から、through-going fault への成長は、クラックによって分離された伸長長石片の破碎によって起こっている。

アルバイト双晶の示す引きずり褶曲は、図版-3 bでは、翼間隔が60°以下に達するまで成長したものである。アルバイト双晶は機械的変形双晶 (mechanical twin) としても形成される (Borg and Handin, 1966<sup>7)</sup>) が、双晶の形成プロセスだけでは図版-3 bの引きずり褶曲のような大きな歪量をもたらすことは出来ないはずである。Marshall and McLaren (1977)<sup>10)</sup> は (010) へき開に沿ったシアクラック群の存在を電顕解析によって明らかにしている。図版-3 bのアルバイト双晶の引きずり褶曲は、このようなシアクラックによるものであれば達成できる歪量である。図版-4 bに見られるアルバイト双晶の非対称褶曲も同様の現象 (flexural-slip folding) として説明可能である。

Marshall and McLaren(1977)<sup>10)</sup> はまた、長石中のパッチ状波動消光や波動消光帯が、「fine mosaics of intragranular microcracks」によって形成される可能性を指摘している。したがって、図版-7 aとb、図版-8 bの斜長石粒に発達する波動消光帯もまた、微細クラックの形成によるものである可能性がある。波動消光帯とその内部の粒状の小波動消光体が、斜長石の塑性変形と動的再結晶作用による再結晶亜粒の形成を示すものである可能性もある。そうであるとすれば本試料の長石の変形は脆性-塑性変形漸移境界での変形によるものと言うことになる。いずれの機構によるものかの決定には、電顕解析が必要であろう。今後の課題である。

石英の変形様式としては次の諸点が指摘出来よう。

- 変形様式の一つの型は、断層に沿うプロトシアゾンが通る位置で、石英中の既存の平行ヒールド・クラック群がシアクラックとして再活動し、クラックで分離され伸長した石英片 (格子方位) の回転をもたらすものである。
- 変形の増大は、クラックで分離され伸長した石英片を破碎し、剪断センターに through-going fault を形成する。

- 変形様式の一つの型は、プロトシアゾンの内部に雁行状配列を示すR1シアクラックとPシアクラックが形成され、R1シアクラックがオーバーラップする位置での大きな歪量を反映して、R1シアクラックとPシアクラックで囲まれた領域内で石英が破碎し、細粒化するものである。この細粒石英集合体は、剪断帯の中央に位置することから、Pシアクラックを媒介して連結する。

- プロトシアゾンに沿った波動消光帯が帯境界に沿ったシアクラックを伴うようにして形成されていることがある。

- 変形様式の一つの型は、既存のヒールド・クラックの発達が顕著なところで、プロトシアゾンの内部に逆センスのR2方向シアゾンが形成され、破碎による石英の細粒化が進行するものである。

石英の主要な変形機構は、R1シアクラック、R2シアクラック、Pシアクラックの形成を通して進行する現象である。このように石英中にシアクラックが初生的に形成されるという事実は、岡野ほか (2001)<sup>10)</sup>、妹尾ほか (2002)<sup>13)</sup>によっても、つくば1350mボーリングの他試料で観察されている。プロトシアゾン内に生成される雁行状R1シアクラックのオーバーラップ部の高歪み帯に出現する石英の破碎細粒化部が、Pシアクラックを媒介として through-going fault へと成長する。

プロトシアゾンの中で適当な方位にある既存のヒールド・クラックはシアクラックとして再活動する。このようなシアクラックによって分離され伸長した石英片が大きな変形量のもとでは破碎細粒化され、through-going faultへと成長する。

図版-9 aとbのようなプロトシアゾンに沿った石英の波動消光帯は、形成機構を一義的に示唆する現象ではない。それは、格子面のキンキングを示唆する現象であり、波動消光帯の帯境界に沿ったクラックは、キンク帯境界に形成されたクラックと見做すことが可能である。そうであるとすれば、本試料の石英の変形機構には、格子面すべりによる変形が含まれる可能性がある。ここには斜長石中の波動消光帯と同様の問題がある。格子面すべりが滑動しない低温条件下では、長石が石英よりも容易に変形する鉱物とされている (Tullis and Yund, 1977<sup>9)</sup>、1987<sup>9)</sup>)。上記の資料からすれば、このような関係は本試料では明瞭ではない。これらの問題の解明には、顕微鏡下で長石と石英に波動消光帯として観察される構造の電子顕微鏡による詳細な解析が必要であろう。今後の課題である。

## 参 考 文 献

- 1) 三本健四郎, 山根 誠, 吉田 浩, 岡野 肇, 妹尾 洋一, 原 郁夫 (2000): つくば技術開発センター1350mボーリングコアの地質学(1)基盤岩類の地質概観. 応用地質技術年報. No.20, pp.43~86.

- 2) Evans, J. P. (1988): Deformation mechanisms in granitic rocks at shallow crustal levels. *J. Struct. Geol.* 10, No.5, pp.437~443.
- 3) Skempton, A. W. (1966): Some observations on tectonic shear zones. *Proc. 1st. Inter. Cong. Rock Mech.* 1, pp.329~335.
- 4) Tchalenko, J. S. (1970): Similarities between shear zones of different magnitudes. *Bull. Geol. Soc. Am.* 81, pp.155~160.
- 5) Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N. G., Dengo, C. and Shimamoto, T. (1979): Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep.* 70-1239, pp.305~343.
- 6) 原 郁夫(1998): 褶曲の見方. 深田研ライブラリー, No.11.東京, 財団法人深田地質研究所, p.225.
- 7) Borg, I. Y. and Handin, J. (1966): Experimental deformation in crystalline rock. *Tectonophys.* 3, pp.251~322.
- 8) Tullis, J. and Yund, R. A. (1977): Experimental deformation of dry Westerly granite. *J. Geophys. Res.* 82, pp.5705~5718.
- 9) Tullis, J. and Yund, R. A. (1987): Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspars: mechanisms and microstructures. *Geology.* 15, pp.606~609.
- 10) Marshall, D. B. and McLaren, A. C. (1977): Deformation mechanisms in experimentally deformed plagioclase feldspars. *Phys. Chem. Min.* 1, pp.351~370.
- 11) Mitra, G. (1978): Ductile deformation zones and mylonites: the mechanical processes involved in the deformation of crystalline basement rocks. *Am. J. Sci.* 278, pp.1057~1084.
- 12) Mitra, G. and Frost, R. B. (1981): Mechanisms of deformation within Laramide and Precambrian deformation zones in basement rocks of the Wind River Mountains. *Contr. Geol.* 19, pp.161~173.
- 13) Hadizadeh J. and Tullis J. (1992): Cataclastic flow and semi-brittle deformation of anorthosite. *J. Struct. Geol.* 14, No.1, pp.57~63.
- 14) 岡野 肇, 妹尾洋一, 三本健四郎, 真鍋弘道, 山根 誠, 吉田 浩, 原 郁夫 (2001): つくば技術開発センター深度1350mボーリングコアの地質学(2) 745.1m 深度の砂質片麻岩中の微小断層群 - 脆性断層の微細機構 -. 応用地質技術年報. No.21, pp.41~79.
- 15) 妹尾洋一, 三本健四郎, 山根 誠, 吉田 浩, 岡野 肇, 原 郁夫 (2002): つくば技術開発センター深

度1350mボーリングコアの地質学(3)-石英のクラック-. 応用地質技術年報. No.21, pp.85-116.

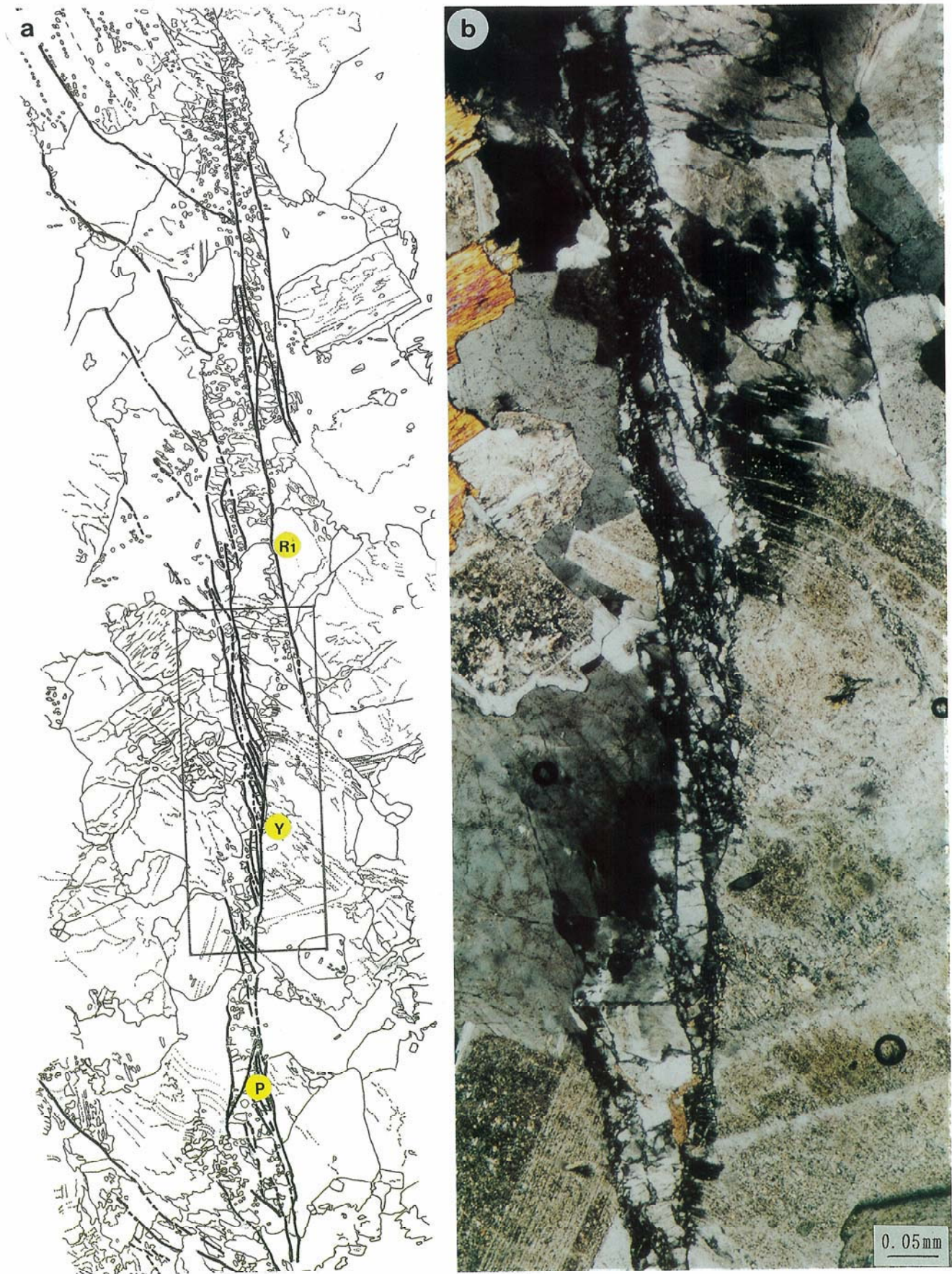


図版-1 718.6m深度の優白質花崗岩コアの顕微鏡写真  
Plate-1 Microphotograph of leucogranite core from 718.6m depth.



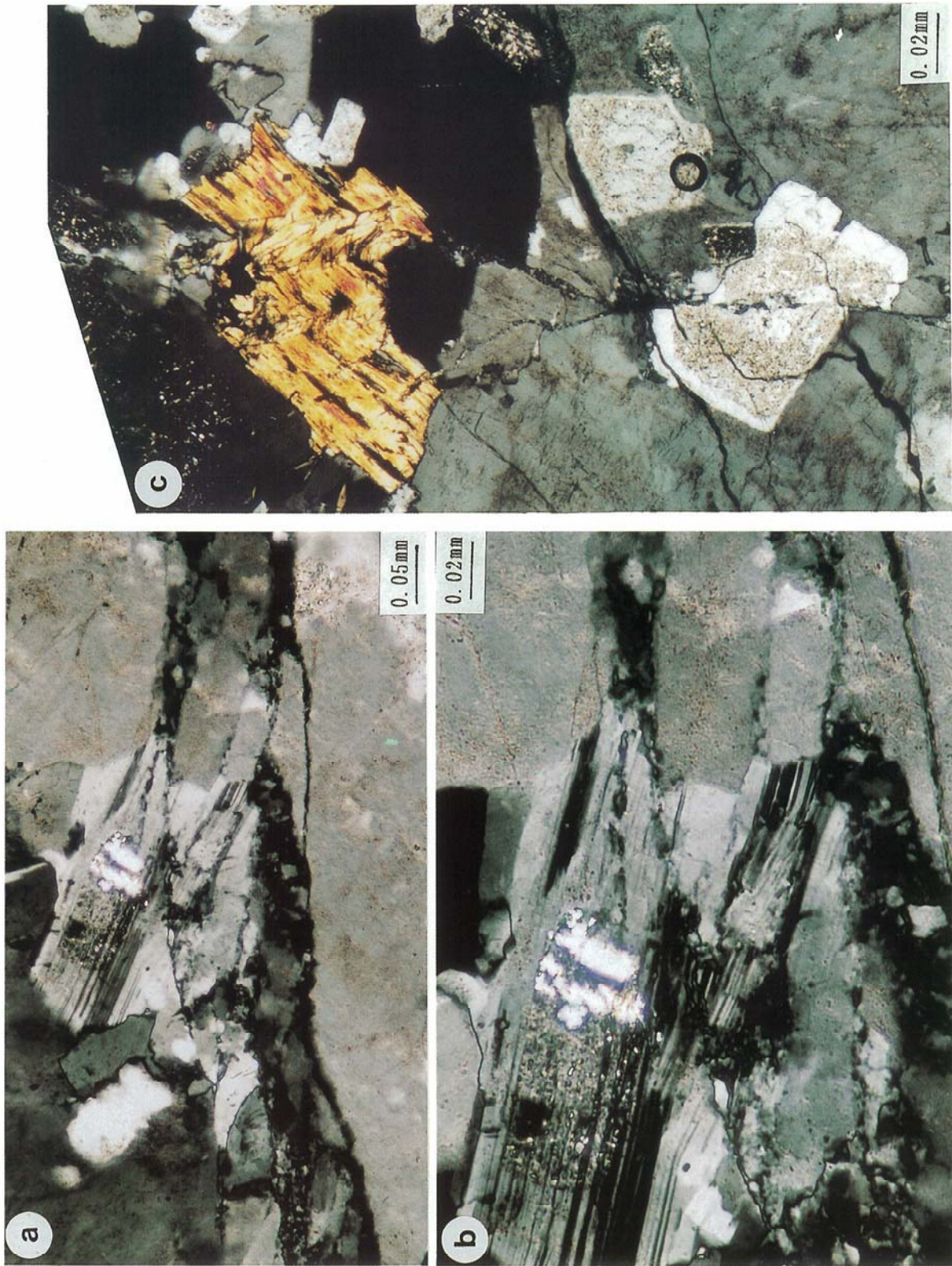
図版-2 図-2の領域aの共役断層の顕微鏡写真。aとb：右横ずれ断層で変位した2つの長石粒

Plate-2 Microphotograph of conjugate faults in domain a of Fig.2. a and b: two feldspar grains displaced by a right-lateral fault.



図版-3 長石を切断する断層：図-2の領域bの断層のスケッチ(a)とその一部の顕微鏡写真(b)。R1, P, Y : R1, P, Y剪断面相当の断層

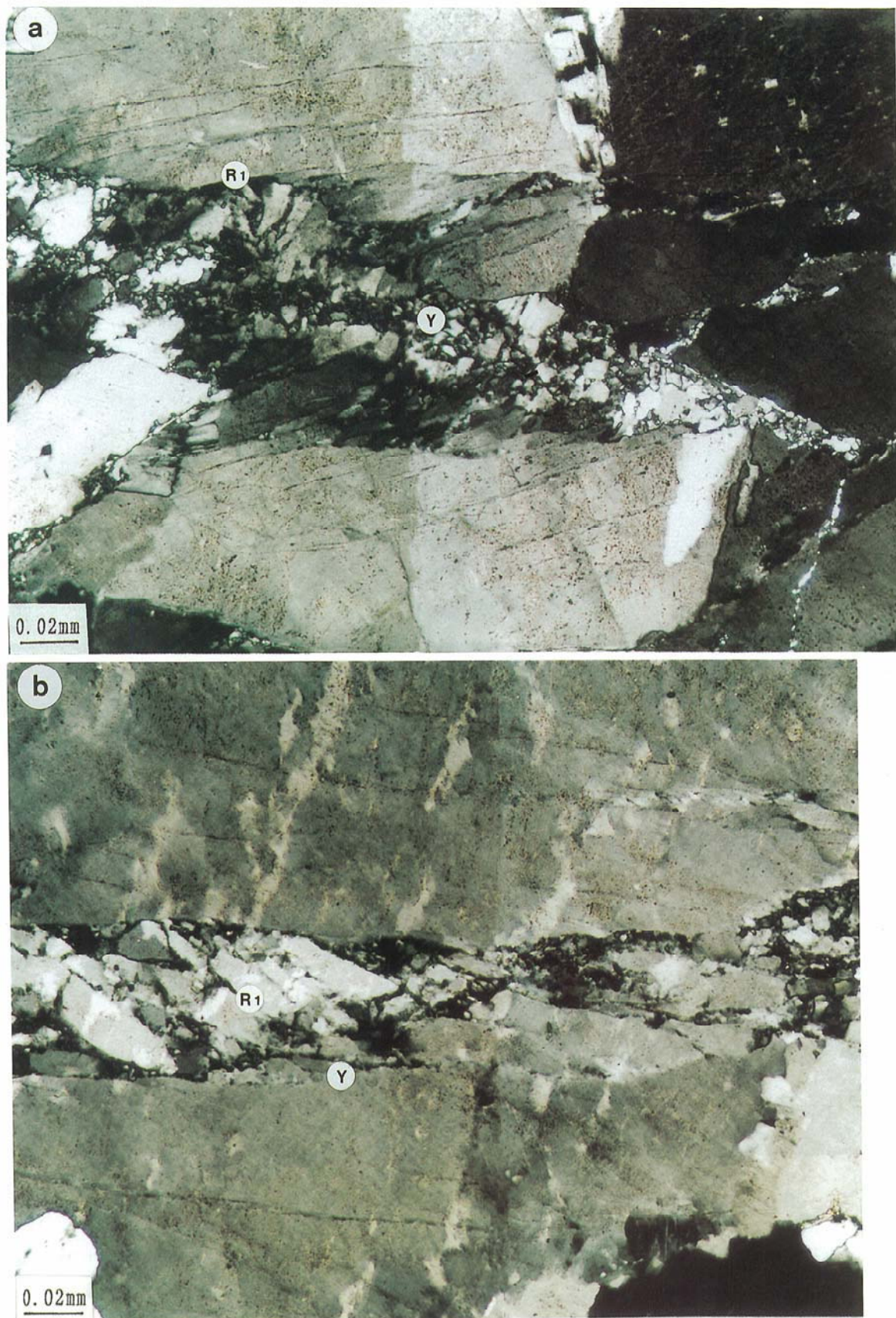
Plate-3 Faults cutting across feldspar grains: sketch of fault in domain b of Fig.2 (a) and microphotograph of a part of the fault (b). R1, P and Y: faults corresponding to R1, P and Y shear planes respectively.



図版-4 aとb：長石を切断する断層 c：長石と黒雲母を切断する断層。

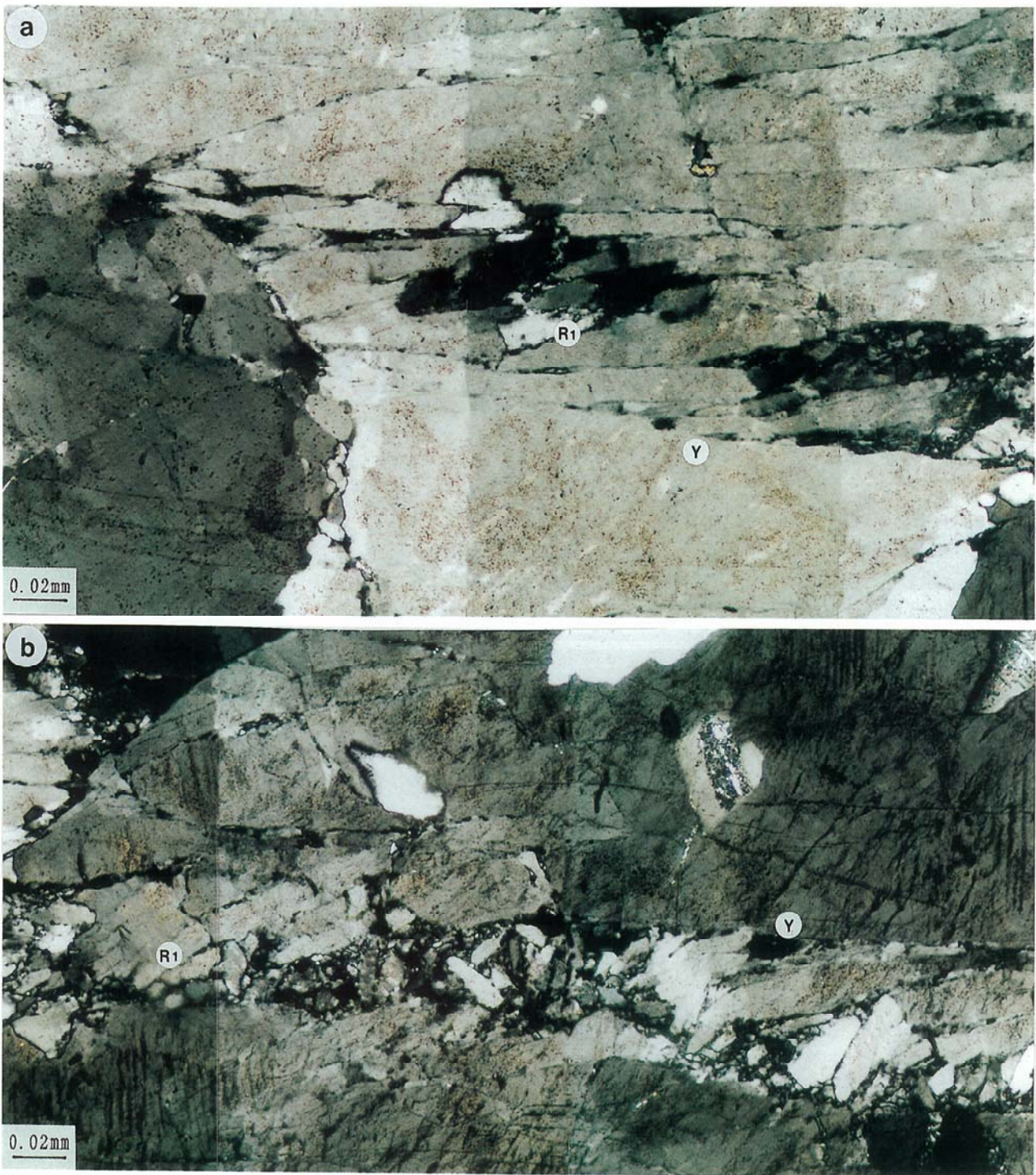
a：図-2の領域kの断層の顕微鏡写真。b：図版-4 aの断層の1部の拡大顕微鏡写真。c：図-2の領域dの断層の顕微鏡写真。

Plate-4 a and b: faults cutting across feldspar grains. c: faults cutting across feldspar and biotite grains. a: microphotograph of fault in domain k of Fig.2. b: enlarged microphotograph of a part of the fault in Plate-4a. c: microphotograph of fault in domain d of Fig.2.



図版-5 aとb: 長石を切断する断層。a: 図-2の領域mの断層の顕微鏡写真。b: 図-2の領域jの断層の顕微鏡写真。  
 Plate-5 a and b: faults cutting across feldspar grains.

a: microphotograph of fault in domain m of Fig.2. b: microphotograph of fault in domain j of Fig.2.

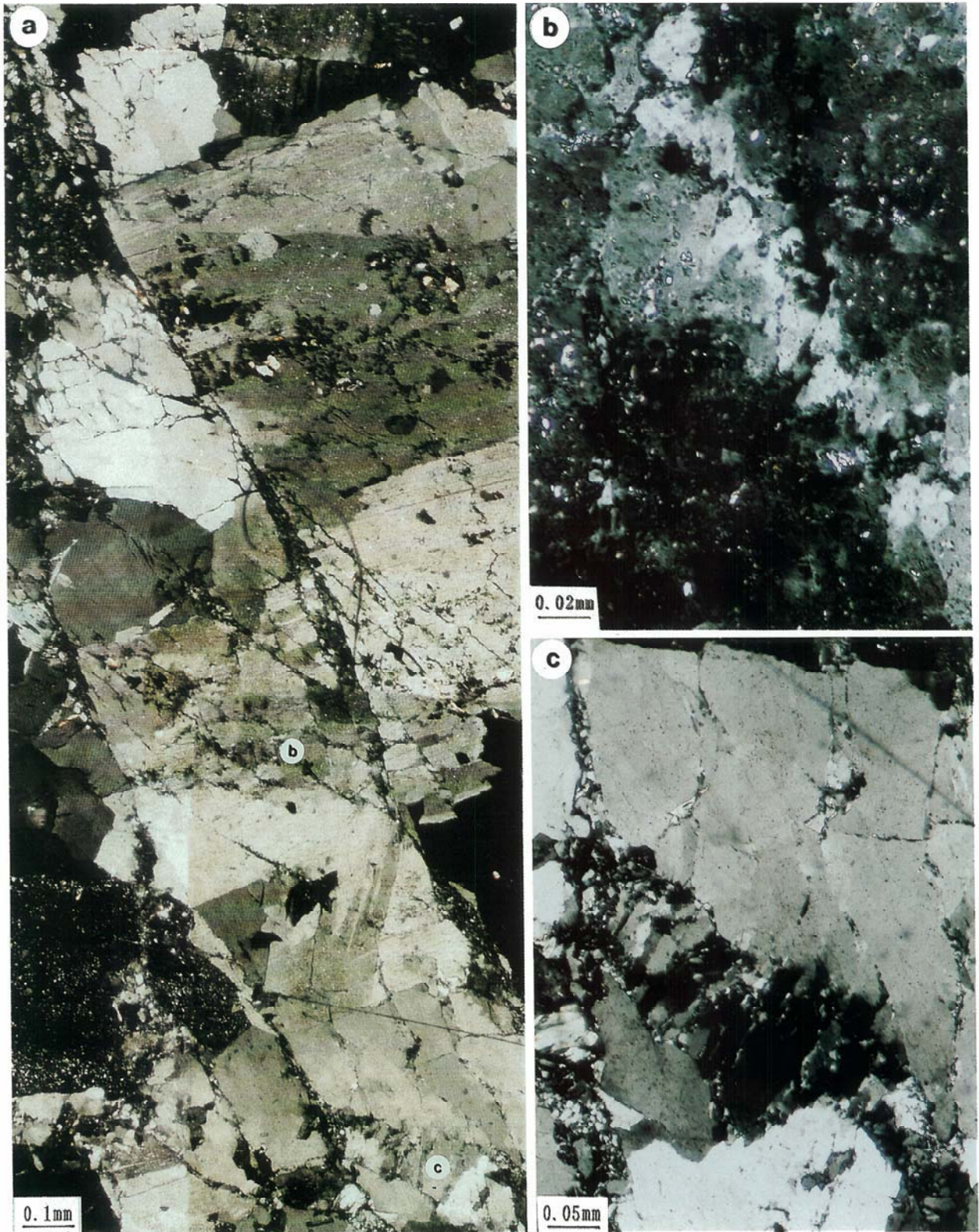


図版-6 aとb:長石を切断する断層。a:図-2の領域iの断層の顕微鏡写真。  
b:図-2の領域hの断層の顕微鏡写真。

Plate-6 a and b: faults cutting across feldspar grains.

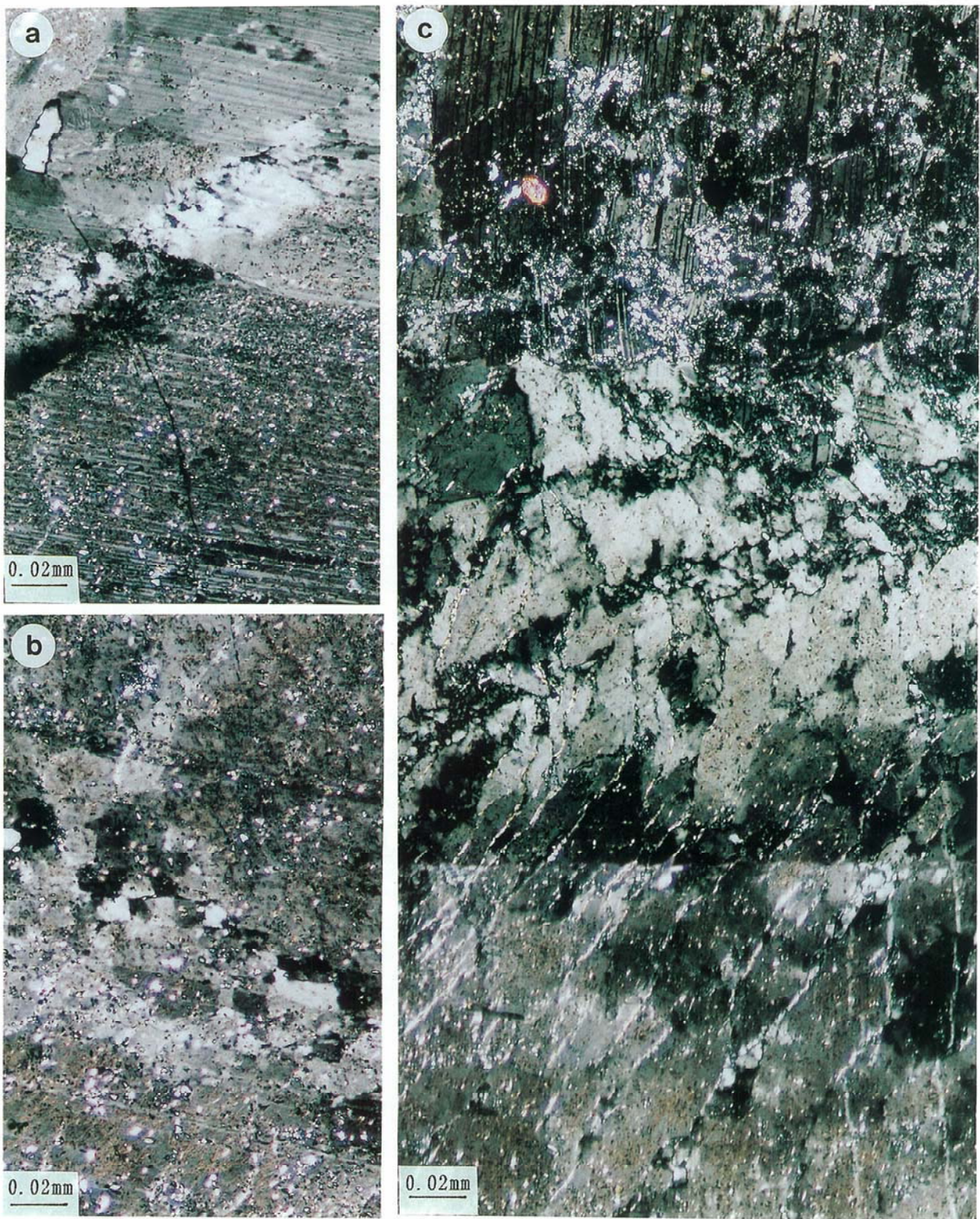
a: microphotograph of fault in domain i of Fig.2. b: microphotograph of fault in domain h of Fig.2.





図版-7 a: 図-2の領域rの断層の顕微鏡写真。b: 図版-7 aの点bで観察される長石中の断層の拡大顕微鏡写真。c: 図版-7 aの点cで観察される石英中の断層の拡大顕微鏡写真。

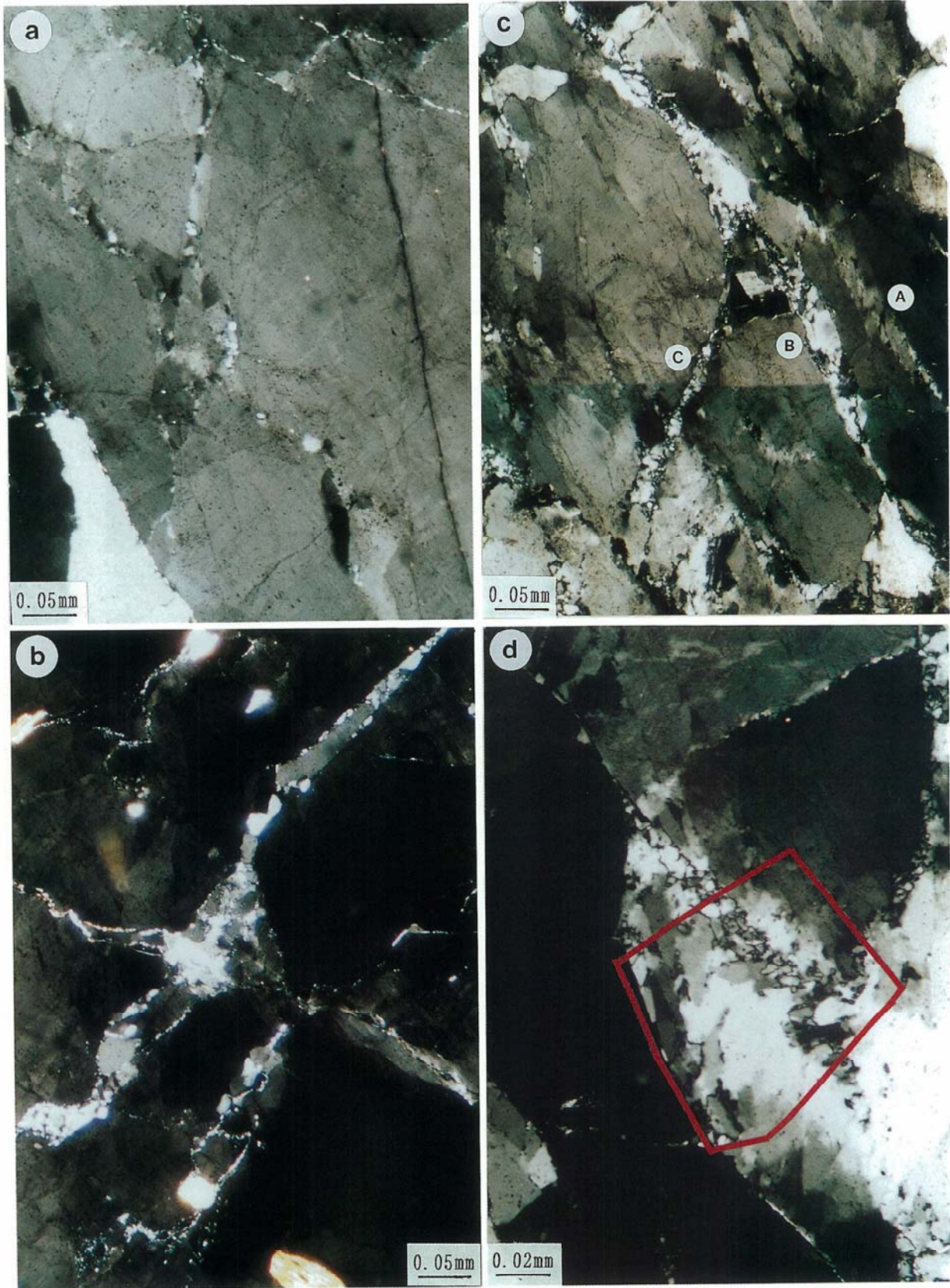
Plate-7 a: microphotograph of faults in domain r of Fig.2. b: enlarged microphotograph of fault as undulatory extinction zone in feldspar grain observed in the point b of Plate-7a. c: enlarged microphotograph of fault in quartz grain observed in the point c of Plate-7a.



図版-8 aとb：図-2の領域nで見られる斜長石中の波動消光帯としての共役断層の顕微鏡写真。

c：図-2の領域oで見られる長石中の断層の顕微鏡写真。

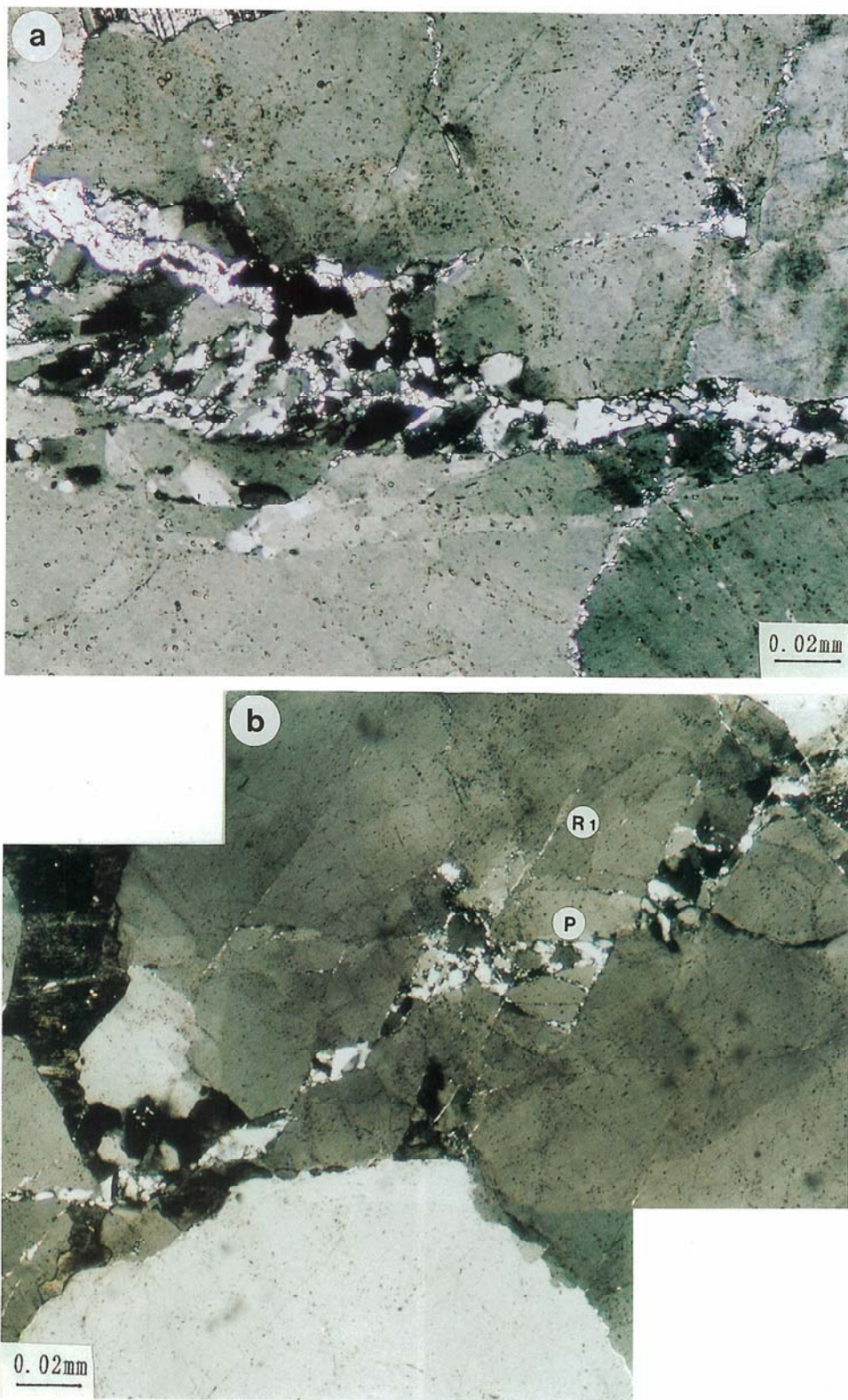
Plate-8 a and b: microphotographs of conjugate faults as undulatory extinction zone in a feldspar grain observed in domain of Fig.2. c: microphotograph of fault in feldspar grain observed in domain o of Fig.2.



図版-9 a, b, c : 図-2の領域g, c, qで見られる石英中の波動消光帯としての共役断層の顕微鏡写真。

d : 図-2の領域pで見られる石英中の断層の顕微鏡写真。

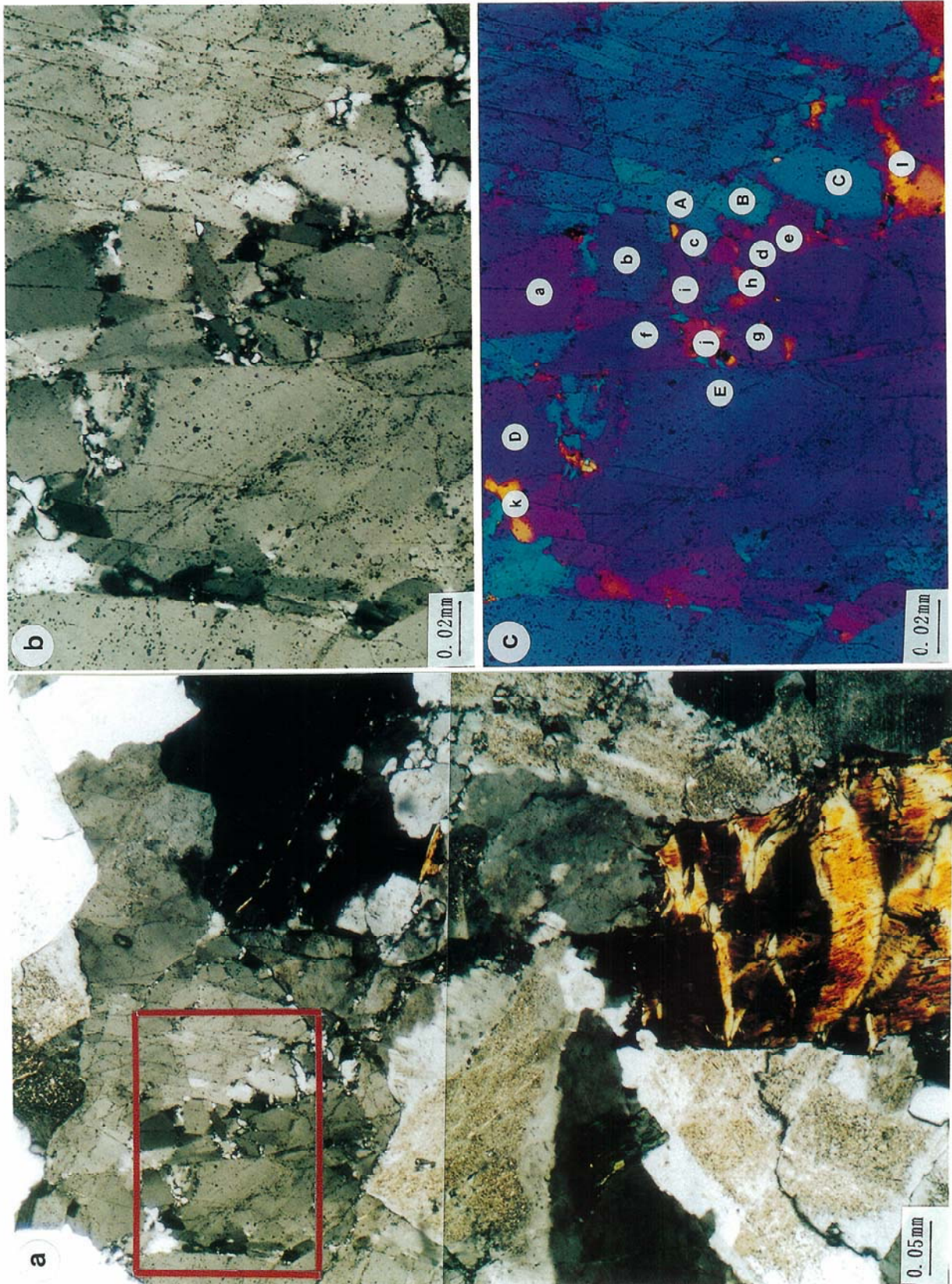
Plate-9 a, b and c : microphotographs of conjugate faults as undulatory extinction zones in quartz grains observed in domains g, c and q, respectively, of Fig.2. d : microphotograph of fault in a quartz grain observed in domain p of Fig.2.



図版-10 a : 図-2 の領域 1 で観察される石英中の断層の顕微鏡写真。

b : 図-2 の領域 f で観察される石英中の断層の顕微鏡写真。

Plate-10 a : microphotograph of fault in quartz grain observed in domain 1 of Fig.2. b : microphotograph of fault in quartz grain observed in domain f of Fig.2.



図版-11 a : 図-2の領域eの断層の顕微鏡写真。b : 図版-11aで観察される石英中の断層の一部(四角で囲まれた領域)の拡大顕微鏡写真。c : 図版-11b領域のジプサム・プレート下で撮影したもの。A~Eとa~l : 図-8のc軸フェブリックの石英粒測定位置。

Plate-11 a : microphotograph of faults in domain e of Fig.2. b : enlarged microphotograph of a part (squared area) of fault in quartz of Plate-11a. c : microphotograph of the domain of Plate-11b under gypsum plate. A~E and a~l : localities of quartz grains for the c-axis fabric of Fig.8.

