

つくば社有地構内1350mボーリングコアの地質学 (6)
 —断層とダメージ帯に発達する微小クラック—

吉田 浩・荒谷 忠・山根 誠・原 郁夫

Geology of the 1350m Boring Cores from the
 OYO CORPORATION TSUKUBA OFFICE (6)

Microcracks in Faults and Their Surrounding Damage Zones

Yutaka Yoshida, Tadashi Araya, Makoto Yamane and Ikuo Hara

Abstract

In psammitic gneiss core from 677.65 m depth of the 1350 m Boring drilled in the OYO CORPORATION TSUKUBA OFFICE (TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER), Tsukuba, Japan are found microfaults of conjugate sets (Set - I and Set - II), whose acute angle is ca. 45° on average. It consists of quartz, plagioclase, K-feldspar, garnet, biotite and graphite associating coarse-grained quartz veins with a little amount of biotite. The veins and host rocks show weak gneissosity of a single set defined by preferred orientation of biotite. Most of the microfaults are recognized as graphite-filled cracks, though they are partly filled with white flaky minerals. Microstructures of the microfaults consisting of graphite-filled cracks and deformation properties of their host rock, as observed on their cross sections under the microscope, are described and discussed in this paper.

The Set - I and Set - II (the first order planar structure) of the microfaults consist of the second order and the third order planar structure. The second order ones are R1 (or T) graphite-filled cracks of one to several mm length, and the third order ones are graphite-filled cracks forming internal structures of the second order ones, which are of three types: A Type = the second order planar structures formed by a single to a few long graphite-filled cracks oriented along their trend. They may be referred to as T, though oriented at low angles (7 to 20°) to the first order planar structure; B Type - I = the second order planar structures as R1 (proto-shear zone) formed by both R1 (or T) and P graphite-filled cracks closely spaced and oriented in an echelon fashion. It is not clear whether graphite-filled cracks oriented at low angles (10 to 20°) to the second order planar structure are referred to as R1 or as T; B Type - II = the second order planar structures formed by both T and P graphite-filled cracks oriented in an echelon fashion. Graphite-filled cracks referred to as T in this type are oriented at middle angles (ca. 40°) to the second order planar structure. Strictly speaking, origin of graphite-filled cracks referred to as P on the basis of their orientation is not yet clarified, but they may be T cracks along the second order planar structures which appear during the later stage of deformation.

The second order planar structures consisting of the A Type and the B Type - I graphite-filled cracks are developed as conjugate sets in psammitic gneiss, while those consisting of the B Type - II graphite-filled cracks are found in coarse-grained quartz. The tip of the first order planar structures (Set-I), which are oriented at high angles to the gneissosity, shows splaying of horsetail type of graphite-filled cracks, while that oriented at low angles to the gneissosity shows splaying of bifurcating type. Such the structures of the tip and central part of the first order planar structures are not related to process zone deformation for the growth of fault proposed so far by many authors, but to deformation corresponding to the strain picture around the end and the central part of proto-shear zone respectively.

Faulting related to the formation of both Set-I and Set-II is associated with various types of deformation throughout their host rock (psammitic gneiss and quartz veins). Such the deformation can be read from the occurrence of an index microstructure as graphite-filled intercrystalline cracks in feldspar-quartz aggregate, though it is also characterized by the formation of grain boundary cracks filled with graphite. A first type deformation is of slip plane type as subordinate microfaults with their ends of horsetail type or bifurcating type splaying. A second type deformation is the formation of deformation bands as narrow bands defined by high-density aggregate of graphite

grains, which are short in length, quite thin in width and wavy and branching in form, and show dimensional orientation along their trend. Within the deformation bands occurs size reduction of quartz and feldspar grains associating the formation of graphite-filled cracks. A third type deformation is related to the occurrence of domains (named here high-density domain) with wide width, which contain graphite-filled cracks in higher-density and the deformation bands. The deformation bands and high-density domains are developed parallel to the Set-I and Set-II, though away from both sets, and to the trend of the acute bisectrix of both sets. The microstructures of both bands and domains are characterized by dimensional orientation of graphite-filled cracks oblique at low angles to the gneissosity and by feldspar and quartz grains coated by graphite-film. And areas of a fourth type deformation (low-density domain) are defined only by the occurrence of graphite-filled intercrystalline cracks in feldspar-quartz aggregate, though they occur in lower density than in deformation bands and high-density domains.

The faulting mentioned above occurred under a physical condition near the brittle-ductile transition of quartz. The distribution pattern of graphite grains (graphite-filled cracks) in this specimen is not correlated with damage zone structure as process zone for growth of faulting proposed so far by many authors. It is a relict of fluid flow during faulting, showing complicated distribution of open cracks, i.e. complicated fluid flow structure, developed in the host rocks and suggests that the faulting was associated with hydrofracturing and/or dilatant deformation.

Keywords: fault, damage zone, crack distribution, graphite

(要 旨)

応用地質株式会社つくばオフィス (旧・つくば技術開発センター) で掘削した1350mボーリングコアの677.65m深度で採集された砂質片麻岩中には、共役セットとして微小断層が見いだされる。共役セット (セット-Iとセット-II) の鋭角は平均で約45°である。砂質片麻岩は石英・斜長石・K-長石・ザクロ石・黒雲母・グラファイトで構成され、少量の黒雲母を伴う粗粒石英脈を伴い、ひとつの片麻構造を示す。この微小断層の主体は、グラファイトが充填するクラック群で構成されるが、その一部に白色葉片状鉱物が充填するクラック群で構成されているものがある。この報告では、断層現象の微細機構とその母岩の変形性状の理解に向けて、クロス・セクションの顕微鏡下で観察されるグラファイト充填クラック群の微細機構が記載され考察される。

セット-Iとセット-II (第一次面構造) は、第二次面構造と第三次面構造で構成されている。第二次面構造は雁行配列を示す1~数mmの長さのR1あるいはTグラファイト充填クラック群。第二次面構造は、一般に第一次面構造に対して低角度 (7~20°) であるため、R1のように見えるが、Tである可能性もある。第三次面構造は第二次面構造の内部構造を形成するグラファイト充填クラック群である。3つの型の内部構造が識別される: A型=第二次面構造に沿った長い1~数枚のグラファイト充填クラックで構成される。B型-I=雁行配列を示すR1 (あるいはT)、Pグラファイト充填クラックで構成される。ここでR1 (あるいはT) としたグラファイト充填クラックは、第二次面構造に対して低角度 (10~20°) で配置し、R1であるのかTであるのか、識別は明瞭ではない。B型-II=雁行配列を示すT、Pグラファイト充填クラックで構成される。ここでTとしたグラファイト充填クラックは、第二次面構造に対して中角度 (約40°) である。Pとしたグラファイト充填クラックは、P相当の配置を示すが、その起源は明らかではない。剪断変形後期に弱く出現した第二次面構造相当のTである可能性も否定出来ない。

片麻構造に高角度で斜交する第一次面構造 (セット-I) の末端には、グラファイト充填クラックのホーステイル型スプレイが発達する。これに対して、片麻構造に低角度をなす第一次面構造 (セット-II) の末端は、片麻構造に沿った bifurcating 型スプレイを形成する。このような第一次面構造の末端と中央部で観察される構造は、多くの研究者がこれまで提唱してきたプロセス・ゾンの変形を示すものではなく、それらは、それぞれ、プロトシア・ゾンの末端と中央部の歪み像を反映した変形を示すものである。

セット-Iとセット-IIの形成に関わる断層現象は、これらの微小断層間の岩石全体に多様な様式の変形をもたらすものとして起こっている。このような変形の発達を示唆するインデックス構造は、長石・石英を切断するグラファイト充填クラックである。その変形様式のひとつは従属断層のような滑り面型である。いまひとつは、短く、薄く、波打ち、分岐を示すグラファイトが、高い密度で集合する狭い帯 (変形帯) の形成である。グラファイトは全体としては変形帯のトレンドに沿った形態配列を示す。石英・長石粒の細粒化が、グラファイト充填クラックの形成とともに起こっている帯である。いまひとつは、グラファイト充填クラックが、比較的高い密度で集合する幅広い帯 (高密度帯) の形成であり、内部に変形帯を包含する。変形帯と高密度帯の構造は、片麻構造に低角度で斜交するグラファイト充填クラックの形態配列とグラファイト・フィルムでコートされた石英・長石粒の形成によって特徴づけられる。両帯は、セット-Iと

セット-IIから離れた位置に発達するが、両方セットのトレンドに平行、または両セットの鋭角二等分線方向に平行である。いまひとつは、上記の構造以外の領域で、長石・石英を切断するグラファイト充填クラックが形成されている領域(低密度帯)である。

本試料に見られるグラファイト粒(グラファイト充填クラック)の分布パターンは、多くの研究者が提唱してきた断層成長のプロセス・ゾーンとしてのダメージ帯の構造に対比されるものではない。この断層現象は石英のbrittle-ductile transition近傍の物理的条件で起こったものである。クラックを充填するグラファイトは、岩石中における流体移動の痕跡であるが、本試料が示した断層現象がもたらす開口クラック分布、したがって流体移動構造は、極めて複雑なものであった。それはまた、この断層現象が、グラファイトの析出をもたらした流体による圧力破壊と/あるいは岩石の膨張的変形を伴うものであったことを示唆している。

キーワード：断層、ダメージ帯、クラック分布、グラファイト

1. 諸言

造構応力場の中で脆性的に変形した地質体には、節理などの形成を伴いながら断層群が形成されている。そのような場で、個々の断層のまわりの地質体、断層間の地質体は、どれほどの広がりにおいて、どのような性状の変形を受けるのであろうか。この問題の検討は、断層現象の理解ばかりでなく、断層を取り巻く領域における流体移動の性状の理解にとっても重要なことであろう。断層の構造は、今日一般に、断層帯(fault zone)の構造として取り扱われ、断層の形成機構との関わりにおいて膨大な研究がなされてきている。しかし、「断層のまわりの地質体、断層間の地質体は、どれほどの広がりにおいて、どのような性状の変形を受けるのであろうか」、「それは変形条件の変化と対応してどのような性状の変化を伴うものであろうか」というような問題としては、必ずしも取り扱われてきていない。

断層帯は、一般に、断層に沿った変位をまかなう断層核(fault core)とそれを取り巻くダメージ帯で構成される(e.g. Chester & Logan, 1986¹⁾)。ダメージ帯は、破碎帯であるが、その変形は断層に沿った変位にはほとんど関与しない。しかし、ダメージ帯に見られる岩石の破碎現象は、断層の発生・成長の機構に関わる情報を与えるものと考えられている(e.g. McGrath & Davison, 1995²⁾; Shinton & Cowie, 2001³⁾参照)。断層が、仮にこのような構造をもつものとして形成されるとしても、このような断層が形成される時、そのまわりのある広がり構成する地質体が同時に、それと連動するようである性状の変形を受けるのであれば、断層の構造の理解には、これらを包括したより広義の断層の構造への考察が必要であろう。

「A fault zone must be considered as a four-dimensional system consisting of slip along the main fault surface and deformation within a volume around that surface, accumulating strain through time」と、Shinton & Cowie (2001³⁾, p. 1825) は指摘するのであるが、断層研究の難しさはまたここにある。彼らは、既往の研究を分析して、断層現象の発生・成長のプロセスへの厳密な考察がなされていないこと、実験は発生・成

長のプロセスをたどりえる手段であるが、「time and length scales」に制約があると述べている。Shinton & Cowie (2001³⁾, p. 1826) は、高い空隙率のNavajo砂岩に発達する断層の研究から、この問題を克服することを試みている。彼らは、彼らの研究を次のように評価している。「The present study is unique in that we have examined the three-dimensional architecture of individual faults, in the same lithology (high-porosity sandstone), as a function of measured displacement along strike from the fault tips where the displacement is negligible to the fault center where the displacement is tens of meters. Furthermore, exposures beyond the point of measurable displacement (i.e., beyond the tip) allow us to document the nature of the process zone in this lithology」。しかし、ここには、観察される断層の末端は断層成長の出発点であり、「Damage zone deformation can be a result of fault rupture events, propagation of the fault tip, ...」(Shinton & Cowie, 2001³⁾, p. 1825) という前提がある。しかし、これらは、断層の起源を説明出来る定説ではなく、いまなお考察の対象である。このため、断層の末端付近の観察から、断層成長の初期段階に関わる情報が得られる保障はない。

断層センターで測定される変位量が小さなもの(=初期段階)と、大きなもの(=成長の進んだ段階)を比較した研究がある(e.g. Antonellini & Aydin, 1994⁴⁾; Aydin & Johnson, 1978⁵⁾)。妥当な研究であるが、Shinton & Cowie (2001³⁾は、これらの研究では、断層の母岩が異なることに問題があるとした。確かに母岩の物理的・化学的性質、したがってまた変形の物理的・化学的條件は、断層現象の性状に大きな効果をもつと考えられる。断層のtemporal evolutionは、なお重要な課題である。

この報告において、著者らは、応用地質株式会社がつくば社有地(旧・つくば技術開発センター)構内において掘削した1350mボーリングの677.65m深度から採集されたコア試料(砂質片麻岩; 図-1)において観察された共役断層とそれを取り巻く領域に見られる断層と同時相の変形構造を記載する。本試料に見られる断層現象は、砂質片麻岩を構成する石英・長石・黒雲母にクラック

(intercrystalline cracksとgrain boundary cracks)の形成を通して進行したものである。重要なことは、本試料でのこの現象が、ひとつには、基盤岩中を移動する流体から炭素がグラファイトとしての析出を伴うように起こったため、断層現象の過程に岩石中に出現した開口クラックは、グラファイト充填クラックとして刻印されていることである。いまひとつは、断層成長の極めて初期段階にあると見做される構造特性を示すことである。このため、本試料では、断層時相における岩石の変形を、主断層形成場に限定することなく、その周辺領域、主断層の間に広がる岩石を通して、グラファイト充填クラックの分布、それが形成する構造として読み取ることが出来る。更にまた、グラファイト充填クラックの分布から、断層現象がどのような広がりとして、流体の移動する場を伴うものであるかを読み取ることが出来る。ここで記載検討される変形構造は小さなスケールのものではあるが、先にあげた断層現象に関わる多様な課題の検討に有効な情報を提供するものと考えられる。

この報告は、つくば社有地構内1350mボーリングのコア試料において、石英の変形がbrittle-ductile transition近傍の条件下で起こったと見られる片麻岩・花崗岩中の断層現象の微細機構に関する、岡野ほか(2001)⁶⁾、妹尾ほか(2002)⁷⁾、斎藤ほか(2003)⁸⁾、Araya et al.(2004)⁹⁾に

よる研究と一連のものである。本試料で記載検討される砂質片麻岩中の断層も、同じような条件下での変形現象と見られるものである。

2. 断層の微細構造

2.1 母岩の鉱物構成と断層

この報告で検討される断層は、677.65m深度で採集された砂質片麻岩コアで観察された微小断層である。顕微鏡観察によれば、母岩は石英・斜長石・カリ長石・ザクロ石・黒雲母で構成されグラファイトを伴う砂質片麻岩であり、変質・風化を示さない(図版-1、2)。片麻構造は、黒雲母の配列によって規定されるが、微弱である。母岩を構成する鉱物は細粒であるが、やや粗粒の石英と黒雲母からなる片麻構造に沿った細脈が認められる。この脈は、図版-1と2では、黒雲母の粗粒部として読み取れる。

本ボーリングの他の砂質片麻岩に比べ、グラファイトの量は、本試料の砂質片麻岩において著しく多い。本試料では、グラファイトの多くは、片麻構造に沿って分布するのではなく、それに斜交する微細な面構造を形成して分布する(図版-1~11と図版-13~19)。図版では黒色の線として認められる。グラファイトが形成する面構造の中の卓越したものが、本試料で観察される断層であり、石英と黒雲母からなる細脈にも分布する。即ち、本試料のグラファイトの多くは、微小クラックを充填する移動物質であり、断層はグラファイト充填クラックが形成する構造である。しかし、このような断層の一部には、葉片状鉱物が充填する微小クラックで形成されているものがある(図版-4)。葉片状鉱物が充填する断層は、低倍率の図版-1と2では見えにくい。葉片状鉱物が充填する微小クラックは、グラファイト充填クラックが形成する断層をなぞるようにして発達している(図版-3、4)。

上記の断層の中の主要なものが、コアの表面で、極めて細い黒色の線として観察される。このような黒色の線は、コア軸にほぼ平行な方向に鋭角二等分線をもつ、共役的な関係を示して発達する。コア軸に垂直な面上では、それらは、ほぼ平行に配列する黒色の線構造として認められる。これらの直交する2つの面上にあって相互に連続する黒色の線は、連続性の良い黒色の面構造が発達していることを示唆している。そして、コアの表面の共役的な黒線は、この黒色の面構造が、コア軸にほぼ平行な方向に鋭角二等分線をもつ共役的な面構造であることを示唆している。

そこで、この共役的な黒色面構造を観察するために、しかも同一の共役的な黒色面構造の連続性とその性状の位置的变化を観察するために、コア軸に垂直な面上ではほぼ平行な黒色の線構造の平均トレンドに垂直で、コア軸に平行に、ほぼ同一深度で、約5mmの間隔で切断された

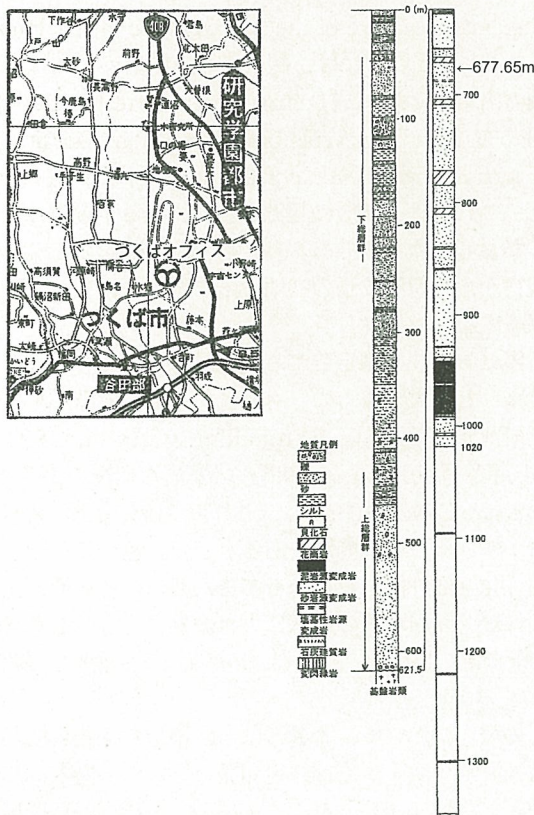


図-1 つくば1350mボアホール の位置とボーリングのコア柱状図。この報告で記載される試料の採集位置

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

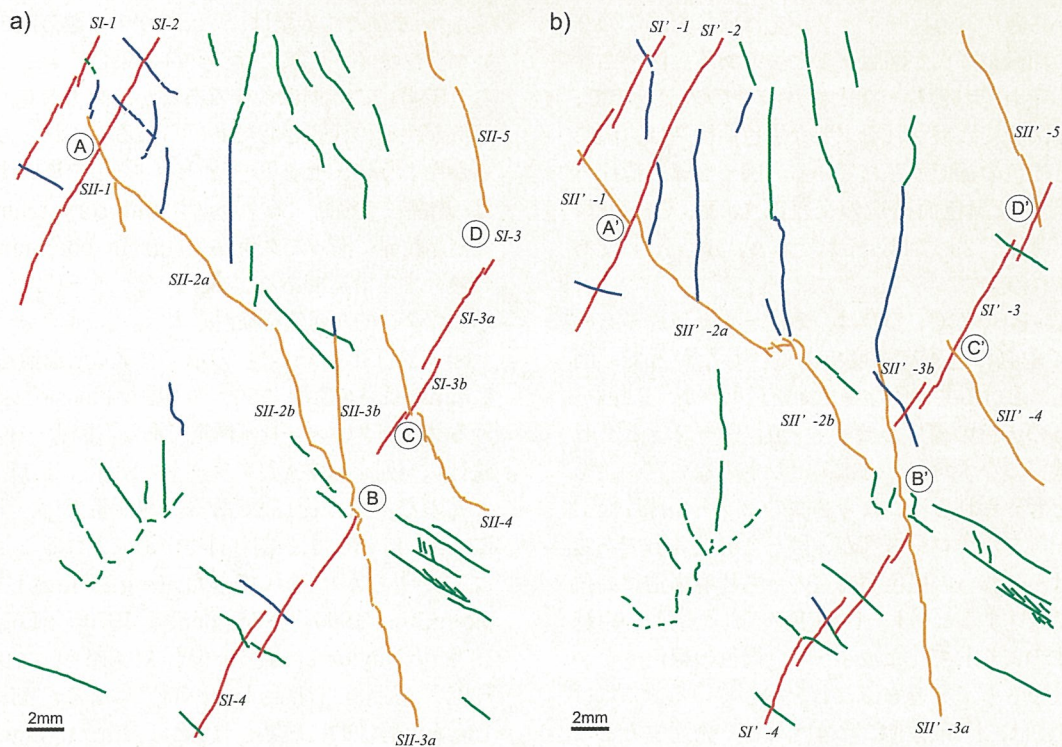


図-2 クロス・セクションで観察される共役断層、セット-I (赤線)とセット-II (褐色の線)、滑り面型従属断層 (青線)、変形帯 (緑線) のスケッチ。a) 薄片-1 (図版-1) の資料、b) 薄片-2 (図版-2) の資料

Fig. 2 Sketches of conjugate faults, Set-I (red lines) and Set-II (brown lines), subordinate faults (slip plane type; blue lines) and deformation bands (green lines) as observed on cross-sections. a) data from the thin section-1 (Plate 1), b) data from the thin section-2 (Plate 2).



図-3 本報告で使用される図版の位置と図の資料収集位置を示す図。a) 図-2a上の位置、b) 図-2b上の位置

Fig. 3 Diagrams showing the localities of Plates and of data for Figures used in this paper. a) localities on Fig.2a, b) localities on Fig.2b.

2つの面から薄片（薄片-1と2）を作成した。この2枚の薄片の顕微鏡写真が図版-1と2である。図-2 aと2 bは、それぞれ薄片-1と薄片-2のスケッチで、試料表面と図版で観察される主要な黑色面構造は、図に赤色の線と褐色の線で示されている。図-2 a（薄片-1）の共役的な黑色面構造の交差部A、B、C、Dは、図-2 b（薄片-2）では、それぞれA'、B'、C'、D'であると想定される。

線分A-A'、B-B'、C-C'、D-D'は、薄片-1と薄片-2の面に対して垂直に近く高角度である。したがって、図版-1と2における共役的な黑色面構造セット-I（図-2 aと2 bの赤色の線）とセット-II（図-2 aと2 bの褐色の線）のなす角は、ほぼ両セットのなす真の角を示すものと考えられる。これら2つのセットの薄片面上における配置を示すローズ図が、図-4 aと4 bである。ローズ図は、これらの黑色面構造のうち片麻構造に高角度をなして発達するセット-I（赤色の線）が著しい卓越方位を示すのに対して、セット-II（褐色の線）がかなりの分散をもって発達することを示している。これは、セット-IIには、片麻構造に低角度なして発達するところと、片麻構造に沿って発達するところがあるためである。セット-IIには片麻構造への収斂が認められる（図版-1、2）。

セット-Iとセット-IIは、その平均的方向が、コア軸にほぼ平行な方向に鋭角二等分線が位置するように発達している。コア軸のまわりのセット-Iとセット-IIのなす角は、約45°と測定され鋭角である。このような黑色面構造は、コア軸に沿った方向からの圧縮応力場で形成された、グラファイトが充填するクラック群から構成される共役断層で、A-A'、B-B'、C-C'、D-D'がそれらの交差線（intersection line）と見做されるものである。セット-Iは左横ずれ剪断、セット-IIは右横ずれ剪断で形成された内部構造を示す。両セットの構造特性を次に記載する。記載に使用される顕微鏡写真（図版）の撮影位置と図の資料収集位置は図-3に示されている。

2. 2 主要断層のマクロ的構造

セット-Iは、図-2 a（図版-1）では、SI-1、SI-2、SI-3、SI-4、図-2 b（図版-2）ではSI'-1、SI'-2、SI'-3、SI'-4であり、それぞれ連続する面構造である。セット-IIは、図-2 a（図版-1）では、SII-1、SII-2a、SII-2b、SII-3a、SII-3b、SII-4、SII-5、図-2 b（図版-2）では、SII'-1、SII'-2a、SII'-2b、SII'-3a、SII'-3b、SII'-4、SII'-5であり、それぞれ連続する面構造である。

顕微鏡観察によれば、両セットを形成する面構造には、大きく分けて2つの型がある：1つの型は、凸凹があるとしても比較的平滑で連続性の良いグラファイト充填クラックで規定される（A型）。この面構造を規定するクラックは、1枚であることもあるが、面構造に沿って2枚あるいは数枚で平行に発達していることもある（図版-

5）。いまひとつの型は、いくつかの卓越方向をもった短いグラファイト充填クラック群の集合によって規定される（B型）。この型は多様であるが、図版-6、図版-7の例が、その代表としてあげられる。これらの図版に明らかかなように、セット-Iとセット-IIを構成する面構造は、結晶粒を横断するクラック（intercrystalline crack）と結晶粒界に沿ったクラック（grain boundary crack）の複合する構造である。まず、セット-Iとセット-IIの示すマクロ的な構造を検討しよう。

図-2のSI-1（SI'-1）の示すマクロ的な構造は、1～数mmの長さのA型クラックの雁行状配列と末端部におけるクラックのスプレイ構造である（図版-1、2、8）。雁行状配列を示すA型クラックとSI-1（SI'-1）のトレンドとのなす角は約15°である。剪断帯では、滑り面R1、R2、X、P、Y、引張割れ目Tが形成されることが実験によって明らかにされてきた（e.g. Riedel, 1929¹⁰; Skempton, 1966¹¹; Tchalenko, 1970¹²; Logan et al., 1979¹³; Naylor et al., 1986¹⁴; Moore et al., 1986¹⁵; 原, 1998¹⁶ 参照）。Tchalenko (1970)¹² はまた、差応力が増大し岩石が脆性的に破壊されYとしてthrough-going faultが形成されるまでの順序は、R1の形成、Pの形成、Yの形成という順序で起こることを明らかにしている。断層の末端構造は多様であるが、McGrath & Davison (1995)²

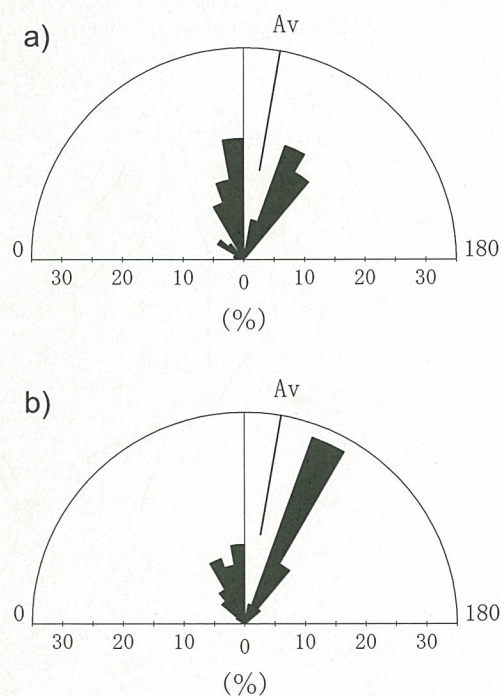


図-4 クロス・セクションにおいて測定された共役断層、セット-Iとセット-II、を構成する第二次面構造の配列方位を示すローズ図。a) 薄片-2（図版-1）の資料、b) 薄片-2（図版-2）の資料。Av：卓越方位の鋭角二等分線の方向。

Fig. 4 Rose diagrams illustrating the orientation direction of the second order planar structures forming the Set-I and the Set-II as conjugate faults as measured on their cross section. a) data from the thin section-1 (Plate 1), b) data from the thin section-2 (Plate 2). Av: acute bisectrix for the dominant directions of both sets.

による纏めがある。これらの成果に従えば、SI-1 (SI'-1) の雁行状配列を示すA型のグラファイト充填クラックのパターンとその末端スプレイのパターンは、それらが、SI-1 (SI'-1) のトレンドに沿った左横ずれ剪断によって形成されるR1あるいはTと末端変形構造に比較される構造である。末端のスプレイ構造はホーステイルと呼ばれる断層末端の構造に比較される。

SI-1 (SI'-1) と同様、すべてのセット-Iの面構造は、その平均トレンドに低角度をなして雁行状配列を示す、1～数mmの長さのグラファイト充填面構造で構成されている (図版-1、2、図-2 a、2 b)。同様のスケールの雁行構造は、セット-IIでも認められる (図版-1、2、図-2 a、2 b)。しかし後で詳細が示されるように、1～数mmの長さのグラファイト充填面構造は、SI-1 (SI'-1) のようなA型クラックとは限らない。そこで、このセット-Iとセット-IIを構成する1～数mmの長さのグラファイト充填面構造を、ここでは便宜的に第二次の面構造と呼ぶことにする。そして、第二次の面構造を包括してその平均トレンドが規定する面構造を第一次の面構造と呼ぶことにする。したがって、セット-Iとセット-IIの面構造は第一次の面構造と言うことになる。図-4のローズ図は第二次の面構造の測定結果である。後で示されるように、B型の構造は、第二次の面構造の内部構造で、図版-1と2の倍率ではほとんど観察出来ない構造である。このため、ここでは便宜的に、B型の構造を形成するスケールの小さな面構造を第三次の面構造と呼ぶことにする。第二次の面構造を構成する2～数枚のA型クラックもまた、第三次の面構造に相当する。

SI-1 (SI'-1) と同じ左横ずれセンスの雁行状配列は、SI-3を除くすべてのセット-Iにおける第二次の面構造が示す構造特性である (図版-1、2、図-2 a、2 b)。SI-3は、しかし、左横ずれセンスの雁行状配列を示す第二次の面構造を含む2組のセット-I (SI-3aとSI-3b) と見ることが出来る特徴も示している (図版-1、図-2 a、図版-9)。

SII-4にはA型クラックの第二次の面構造の雁行状配列が認められる (図版-9)。第二次の面構造がSII-4のトレンドとなす角は 10° にみたない低角度である。雁行状配列のパターンは、この第二次の面構造が、SII-4のトレンドに沿った右横ずれ剪断によるR1に比較される構造であるように見える。しかし、極めて低角度ではあるが、T相当クラックである可能性もあろう。SII-4のトレンドは片麻構造に対して低角度であるが、その先端は黒雲母片に富む位置で片麻構造に沿ったグラファイト充填クラック群へ収斂している。このような関係は、SII-1 (SII'-1) からSII-2a (SII'-2a) への移行——SII-2a (SII'-2a) は片麻構造に沿って発達 (図版-1、3) ——、SII-2b (SII'-2b) の末端 (図版-1、7) としても認められる。ローズ図 (図-4) において、セット-IIが大きな分散を示すのはこのためである。

第二次の面構造は、SII-1 (SII'-1) ～SII-2b (SII'-2b)

～SII-3a (SII'-3a)、SII-5 (SII'-5) においても、SII-4と同じセンスの雁行状配列を示している (図版-1、2、図-2 a、2 b)。セット-IIの雁行状配列を示す第二次の面構造の多くは、bend typeのステップ (cf. Childs et al., 1996¹⁷⁾) による連結 (linkage) を示す。このステップは黒雲母片に富む位置で片麻構造に沿うように起きている。これに対して、片麻構造に高角度をなして発達するセット-Iの第二次の面構造は、先に記載したように、凸凹があるとしても比較的平滑な面構造であり、雁行状配列の多くはオーヴァーラップ型 (cf. Childs et al., 1996¹⁷⁾) で連結を示さない (図版-1、2、図-2 a、2 b)。

片麻構造には強度異方性があることが知られている (e.g. Deklotz et al., 1966¹⁸⁾; 阿部ほか, 2003¹⁹⁾)。黒雲母片の増加は片麻構造に沿った剪断強度を低下させる。低角度をなして発達するセット-IIの第二次の面構造が、黒雲母片に富む位置で片麻構造に収斂し片麻構造をトレースするように発達したり、雁行状配列を示す第二次の面構造が黒雲母片に富む位置で片麻構造をトレースするようにしてbend typeのステップを形成するのは、この強度異方性の反映であると考えられる。

以上の記載事項は次のように纏められる。コア軸をほぼ鋭角二等分線とし共役的關係をもって発達するセット-Iとセット-IIは、1～数mmの長さのグラファイト充填クラック (第二次面構造) で形成される。第二次面構造は雁行状配列を示す。セット-Iの第二次面構造は左横ずれ剪断のR1あるいはT相当の配置を示し、セット-IIのそれは右横ずれ剪断のR1あるいはT相当の配置を示す。したがって、両セットは、コア軸方向からの圧縮応力の作用によって形成されたクラック群としての特徴を示すと言うことが出来る。

2. 3 主要断層の微細構造

では、セット-Iとセット-IIの第二次面構造の内部構造を形成する第三次面構造はどのような性状を示すのであろうか。セット-Iとセット-IIの第三次面構造もまた、それぞれ第二次面構造が示唆するのと同じセンスの剪断変形によって形成された構造特性を示している。いくつかの代表例をあげ記載しよう。

SI-2 (SI'-2) は、厚みのある連続性の良い第二次面構造で形成されている (図版-1、2、3、6)。この第二次面構造の内部構造は、順次出現するいくつかの異なる方位のクラック群 (第三次面構造) の重複によって形成されたものである——したがって後から出現するクラック群は、先に出現したクラック群の構造を破壊する。しかし、ところどころで、特定の時期の特定の方位のクラック群だけが卓越して発達していて、内部構造が比較的読み取りやすくなっている。図版-6と7は、そのような部分の顕微鏡写真である。

図版-6 a (b) の第二次面構造は、2つのセットの薄い連続性の良いグラファイト充填クラック群で構成

されている。1つのセットは、卓越するクラック群であり、反時計廻りに測定して第二次面構造のトレンドに平均約 20° の低角度をなし、狭いスペーシングで雁行状に積層する構造を形成している。いまひとつのセットは、顕著ではないが明瞭であり、時計廻りに測定して第二次面構造のトレンドに約 5° 程度の低角度で発達するクラック群である。このような2組のクラック群の発達は、図-5 aのローズ図に明瞭である。卓越する雁行状クラック群といまひとつのクラック群は、それぞれ、SI'-2の第二次面構造に沿った左横ずれ剪断による、R1とPに比較される配置を示している。図版はまた部分によって、

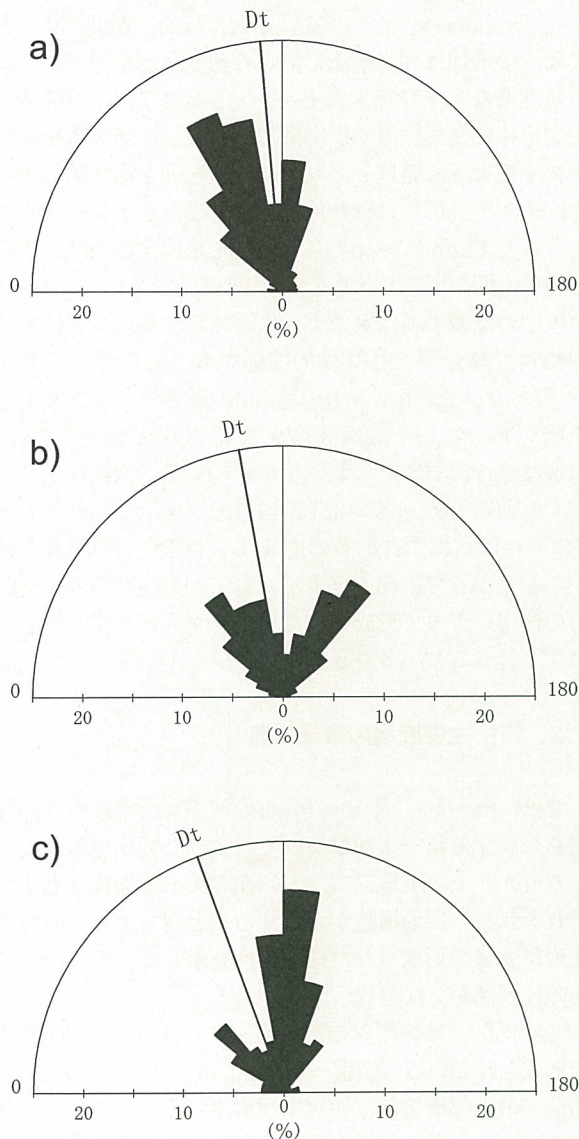


図-5 セット-Iとセット-IIの第三次面構造（グラファイト充填クラック）の配列方位を示すローズ図。a) 図版-6 a (b)のSI'-2からの資料、b) 図版-7 aのSII-2bからの資料、c) 図版-6 c (d)のSII-3aからの資料。Dt: 各図版内でのセット-Iとセット-IIの第二次面構造のトレンド

Fig. 5 Rose diagrams illustrating the orientation direction of the third order planar structures (graphite-filled cracks). a) data from the SI'-2 in Plate 6a(b), b) data from the SII-2b in Plate 7a, c) data from the SII-3a in Plate 6c(d). Dt: trend of the second order planar structures forming the Set-I and Set-II as measured within plates.

R1相当のクラックとP相当のクラックの組合せ連結による厚いグラファイト充填クラック（Y相当クラック）が発達することを示しているように見える。このR1相当クラック群の雁行性から想定される、グラファイト充填クラック群の形成に関わる横ずれ剪断変形は、第二次面構造の配列パターンから想定されたセット-Iに沿った横ずれ剪断変形と調和的であり、左横ずれセンスである。

しかし、R1相当クラックと見たものは、黒雲母と接触した位置で、黒雲母を切断しない。これは、R1相当クラックとしたものがTである可能性を示唆する情報のようにも見える。もし、T相当であるとすれば、P相当と見られるグラファイト充填クラックは、どのように考えるべきであろうか。上記のようなR1の否定は、モードIIクラックの否定である可能性があるからである。ここに問題があるが、後頁で議論されよう。

次にセット-IIの第二次面構造の内部構造について2つの例を記載検討しよう。図版-7の例の第二次面構造の内部構造は、図版-7 bから明らかなように、粗粒石英を切断して発達するグラファイト充填クラック（第三次面構造）が形成するものである。このグラファイトが厚く充填するクラックの外壁の方位を測定して作成されたローズ図が、図-5 bである。図は、クラックが、第二次面構造のトレンドに斜交する、2つのセットが卓越するように発達することを示している：時計廻りに約 40° の方位をもつセットT、反時計廻りに約 20° の方位をもつセットP。図版は、これらに加えて、セットTとセットPを組合せて連ねるようにして形成される厚いグラファイト充填クラック（セットY）が発達することを示している。セットYの平均トレンドが、SII-2bの第二次面構造のそれに相当する。これらのクラック群は、その配置から、右横ずれ剪断場において、セットTがT（引張割れ目）、セットPがP、セットYがYに比較される構造であると見做されよう。同じように石英を切断するクラックで、図版-6 a (b)のR1相当と見做されたクラック群が第二次面構造に対して約 20° の斜交角を示していることからすれば、 40° の斜交角をもつ図版-7のセットTは、T相当と見做するのが妥当であろう。しかし、ここにも図版-6、図版-7の例と同様の問題が存在する。

図版-4 aは、SII-2bの部分（第二次面構造）——図-2 aに示されているように、図版-7の位置の少し下の部分——の顕微鏡写真である。ここでは、SII-2bは、グラファイト充填脈と葉片状鉱物充填脈の複合として形成されている。図版において葉片状鉱物は、SII-2bのトレンドに低角度で斜交する明瞭な形態定向配列を示している。この形態定向配列が規定する片理Sの配置から、葉片状鉱物は、右横ずれ剪断場で結晶したものと判断される（原、1998¹⁶参照）。図版下端のSII-2bの外壁の黒雲母は、 $\{001\}$ 格子面が、雁行褶曲群を形成し変形していることを示している。この雁行褶曲群はまた、SII-2bに沿った右横ずれ剪断変形を示唆している。このことは、もし第二次面構造がTとして発生したのであれば、このT

クラックに沿って剪断変形が重複したことを示すものである。

いまひとつのセット-IIの第二次面構造は、図版-6c(d)の中央に約70°の高角度で発達する厚いグラファイト充填クラック(SII-3a)である。その内部構造を規定する第三次面構造の配列方位は、先の図版-6a(b)の例と同様、グラファイト充填クラックの外壁の方位として測定し、ローズ図(図-5c)が作成された。最も卓越するクラック群(セットR)は、図版の長軸方向に沿って発達するもので、時計廻りに測定して第二次面構造に対して約20°斜交する。いまひとつの卓越クラック群(セットP)は、反時計廻りに測定して第二次面構造に対して約25°斜交している。セットRとセットPを組合せて連ねるようにして形成された厚いグラファイト充填クラック(セットY)も認められる。これらのクラック群は、その配置から、右横ずれ剪断場において、セットRがR1、セットPがP、セットYがYに比較される構造であると見做されよう。しかし、ここにも図版-6a(b)、図版-7の例と同様の問題が存在する。

以上に記載されたセット-IIの第三次面構造の構造特性(図版-7、図版-6c(d))と、セット-IIIに沿った葉片状鉱物の示す構造特性(図版-4a)から想定される、グラファイト充填クラック群の形成に関わる横ずれ剪断変形は、第二次面構造の配列パターンから想定されたセット-IIに沿った横ずれ剪断変形と調和的であり、右横ずれセンスである。

2. 4 主断層に沿う変位量

明瞭な雁行性クラック群の形成、これらのクラック群の組合せ連結によるY相当のクラックの形成は、本試料の主断層セット-Iとセット-IIに沿った剪断変形が、ある程度の大きさのものであることを示唆している。図版-4aの黒雲母の褶曲と白色葉片状鉱物の形態定向配列からもまた、ある程度の大きさの剪断変形が想定される。しかし、本試料の主断層には、充分成長したthrough-going faultを形成するほどには、変位量が大きなものではなかったことを示す構造が多く観察される。

SI-2は、図版-3に見られるように、SII-1との交差部より下半部において、黒雲母片を切断していない。図版-6a(b)は、その連続体であるSI'-2が、顕著な雁行性クラックの発達を示すにも拘らず、その連続が黒雲母片によって遮られていることを示している。黒雲母片によるセット-Iの遮断は、SI'-3にも明瞭である(図版-5a(b))。図版-10では、黒雲母片によるSI-4クラックの屈折と遮断が明瞭である。図版-5でも、その連続体であるSI'4の黒雲母片によって遮断が認められる。

SII-2b(SII'-2b)下部から末端までの区間のセット-IIでは、片麻構造に斜交する第二次面構造と片麻構造に沿った第二次面構造が、90°に近い角度のbend typeステップを形成しており、これらを貫通するthrough-

going faultへの構造破壊は認められない(図版-1、2、11)。SII-2bの末端は片麻構造に沿った黒雲母の集合部で消えている(図版-11a)。SII-3aもまた、片麻構造に沿った第二次面構造と片麻構造に斜交する第二次面構造が、90°に近い角度のbend typeステップを形成している。ここでは、片麻構造に斜交する第二次面構造にグラファイト充填部、片麻構造に沿った第二次面構造に葉片状鉱物充填部が交互に現われ、これらを貫通するthrough-going faultへの構造破壊はほとんど認められない(図版-1、2、11a)。SII'-2bの下部から末端では、bend typeステップを形成しながら、クラックのホーステイル型スプレイが起こっている(図版-11b)。このことから、図版-11aにおいて、SII-2bの末端は、SII-3b~SII-3aに収斂していないものと推定される。SII-4においても、雁行状配列を形成する第二次面構造を貫通するthrough-going faultへの構造破壊は認められない(図版-9)。

上記の事実は、本試料の主断層では、through-going faultを形成するほどには大きな変位量の破壊は行なわれず、断層の成長は未成熟であったことを示している。このような変形段階では、主断層の周囲と母岩は、どのようなダメージを受けているのであろうか。次にこの点を検討しよう。

3. ダメージ帯と従属断層群

本試料では、上記のセット-Iとセット-II(本試料の主断層)を取り巻く母岩のいたるところに、多量のグラファイトが多様な方位をもって分布する。このことは、図版-3(図-7)、図版-13~19、図-6に明瞭である。図-6は、図版-1の右下半部の領域におけるグラファイト分布を、拡大顕微鏡写真からスケッチしたものである。砂質片麻岩は、泥質片麻岩とは違って一般に、初生的には極めて僅かな量でしかグラファイトを含まない岩石である。しかし先に述べたように、本ボーリングのコアで見られる他の砂質片麻岩に比べても、本試料の砂質片麻岩のグラファイトの量は異常に多い。このため、本試料に見られるグラファイトの多くは、上記のようなセット-Iとセット-IIとの関係からすれば、断層発生時に岩石中を移動した炭素が、ダメージとして形成されたクラック群に、グラファイトとして析出充填したことが想定される。このような現象が、本地域の基盤岩に同じ変形時相に起こったことは、本ボーリングの他のコア試料からも明確に確認されることである。図版-12がその2例を示したものである。図版-12a(b)には、花崗岩(768.7 m深度コア)に発達する脆性的断層の断層コア(fault core)のカタクレーサイトを縦断するグラファイト脈が観察される。図版-12c(d)には、泥質片麻岩(693.4 m深度コア)中の石英脈を切断する脆性的断層のダメージ帯の石英に発達するグラファイト充填クラック群が認められる。

本試料で、主断層を取り巻く領域、主断層間領域にお

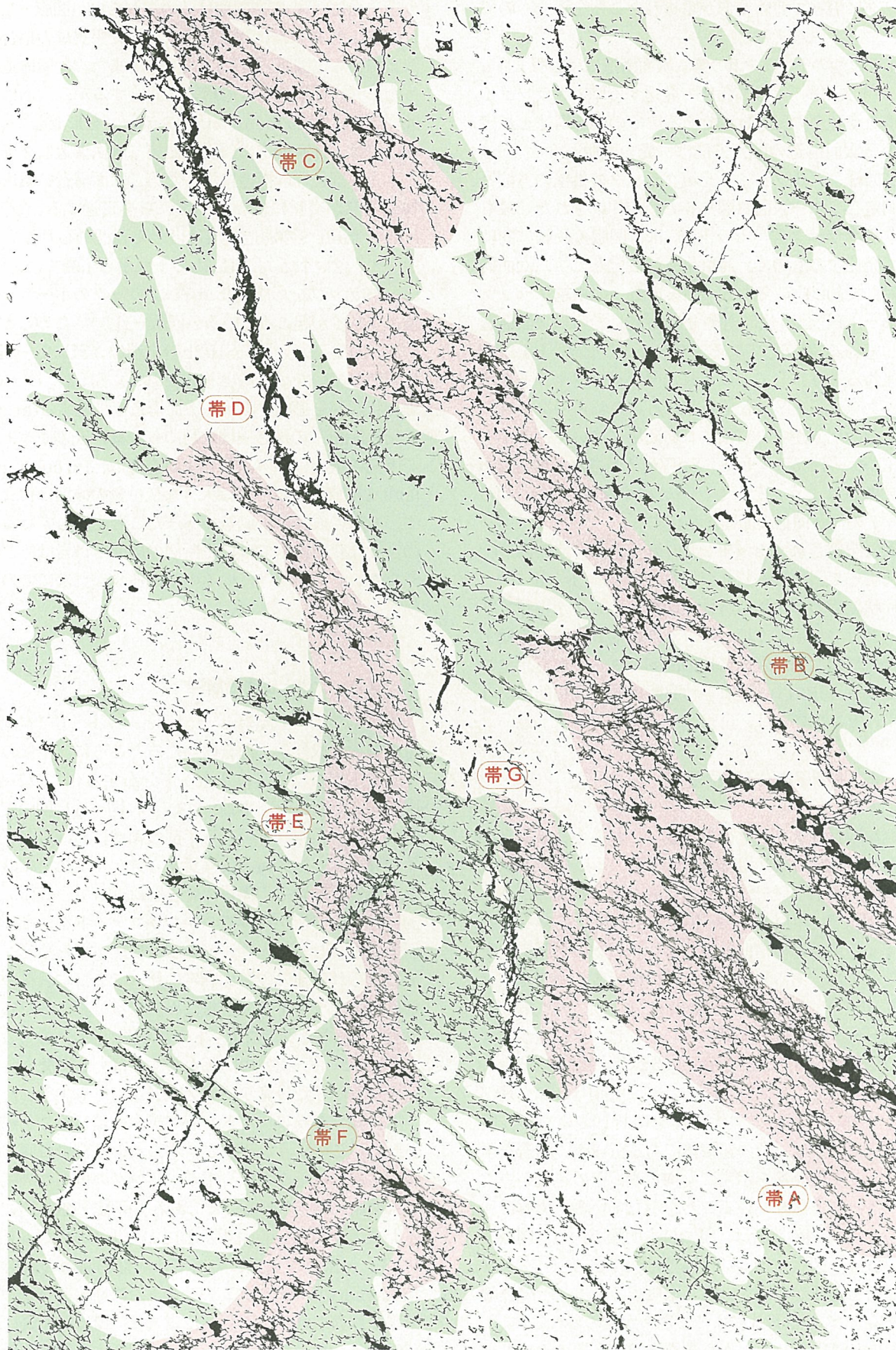


図-6 図版-1の一部におけるグラファイト粒のスケッチと、グラファイト分布の高密度帯（ピンク）と低密度帯（黄緑色）を示す。説明の詳細は本文。

Fig. 6 A sketch of graphite grains in a part of Plate 1, showing high-density domains (pink) and low-density domains (yellowish green) of graphite-filled cracks distribution. For fuller explanation see the text.

いて、グラファイト充填クラック分布の広がり性状を解明することは、断層発生時のダメージの広がり (=開口クラック分布) とその構造の理解にとって、極めて重要な情報をもたらすものと考えられる。そこで、まず、グラファイトの形成する構造の中から、主断層との幾何学的関連性、あるいは主断層の形成に関わる応力場との関連性において、その構造特性のもつ意味が比較的容易に理解説明出来るようなものを識別することを試みる。またグラファイトの密度分布の不均質性が注目される。

3. 1 従属断層群

(1) 滑り面型

主断層を取り巻く領域、主断層間領域において、多数

のグラファイトが多様な方位をもって分布する中のところどころで、下記のようなグラファイトの形成する構造が識別される。これらは、いずれも、主要断層よりも微弱な構造であるため読み取りにくい、明瞭である。そのひとつは、顕微鏡スケールで長く連続する薄いグラファイト充填クラック (Ss) である。図版-3 (図-7)、図版-13、図版-14 a に、その代表例が示されている。このようなSsクラック群の中で顕著なものが、図-2 a と2 bにおいて、青色の線で示されている。いまひとつは、図-2 a と2 bにおいて緑色の線で示されたものである。これは、短い長さの薄いグラファイトが多数集合する帯として、その周囲から明確に識別される構造 (Sd) である。図版-15、図版-16に、その代表例が示されている。記載の便宜上ここでは、前者 (Ss) を滑り面型、

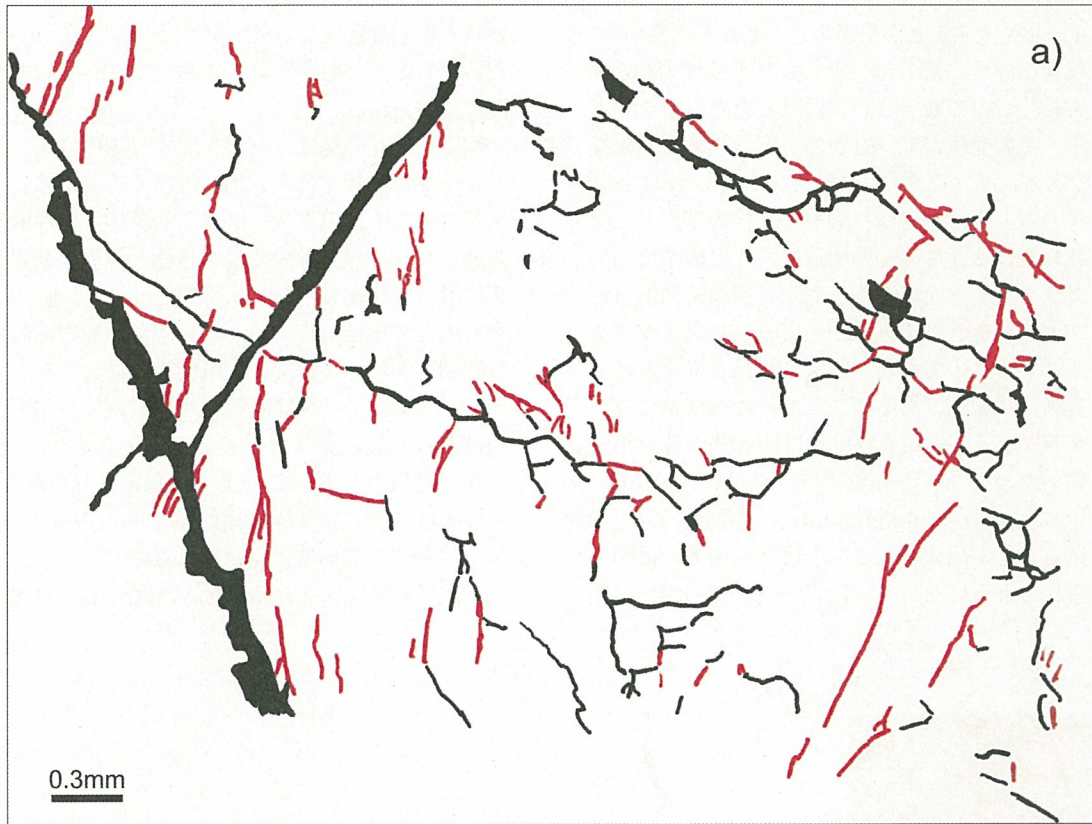


図-7 a) 図版-3の中央部におけるグラファイト粒、Ct (赤線) とCg (黒線)、のスケッチ。b) Cgの配列方位を示すローズ図、c) Ctの配列方位を示すローズ図。Av: 共役断層セット-Iとセット-II (幅広い黒線) の鋭角二等分線

Fig. 7 a) a sketch of graphite grains, Cg (solid lines) and Ct (red lines), in the central part of Plate 3, b) rose diagram illustrating of the orientation direction of Cg, c) rose diagram illustrating of the orientation direction of Ct. Av: acute bisectrix of conjugate Set-I and Set-II (solid lines with large width).

後者 (Sd) を変形帯 (deformation band) 型として識別する。重要な事実は、薄片-1 で観察される Ss (Sd) の多くは (図-2 a)、薄片-2 においても Ss あるいは Sd (Sd あるいは Ss) として観察されることである (図-2 b)。即ち、これらは、微弱ではあるが連続性のある面構造である。そして、以下に示されるように、これらの面構造は剪断帯特有の構造特性を示す。

滑り面型の4つの代表例を示そう。図版-13 a (b) の Ss の構造は、1つの平滑なグラファイト充填クラック (A型) とホーステイル型の末端構造で形成されている。末端スプレイの広がりには偏りがあり、偏り方のセンスは、上端は左へ、下端は右へととなっている。これは、この Ss が、左横ずれセンスの剪断変形で形成された滑り面であることを示唆する。したがって、この Ss は、配列方位は図-3 a に見られるようにセット-Iとセット-IIの鋭角二等分線に近いが、剪断センスからセット-Iの従属断層 (Ss-I) と見做すことが出来よう。しかし、Ss が2つの粗粒石英を切断する部分は、その配置からすれば、Tとして発生し、ついで断層として活動したと見ることも可能である。その発生がTかR1かの決定は極めて困難なことなのである。

図版-3の右上端部の Ss は、図-8に拡大写真とスケッチが示されている。この Ss の構造は、片麻構造に高角度をなすグラファイト充填クラックが片麻構造に沿った短いグラファイト充填クラックと bend type のステップを形成して連結するものである。ステップは右横ずれ剪断を示唆する雁行状配列である。ここで、片麻構造に高角度をなすグラファイト充填クラックは R1 相当、片麻構造に沿った短いグラファイト充填クラックは P 相当のモード II クラックで、through-going fault への初期段階を示すものと見ることが出来る。この Ss は、配列方位は図-3 a に見られるようにセット-Iとセット-IIの鋭角二等

分線に近いが、剪断センスからセット-IIの従属断層 (Ss-II) と考えられるものである。しかし、ここでも図版-13 a (b) と同様の問題が存在する。雁行配列を示すグラファイト充填クラックは、その配置からしてもモード I クラック、即ち T として発生した可能性はある。

図版-13 c の中央に、図版の長軸に垂直な方向に2本のグラファイト充填クラックが認められるが、これは図版-1 (図-2 a) の SI4 の第二次面構造である。SI4 には黒雲母に接した位置で屈折が認められる。この SI4 とほぼ直交して片麻構造に沿って2つの Ss が発達する。この Ss のいずれの末端にも、グラファイトの形成する面構造の bifurcating 型スプレイ (cf. McGrath & Davison, 1995²⁾) が認められる。上位の Ss を構成するグラファイトの形成する面構造は、一部で雁行状配列を示す。この雁行状配列のパターンと末端の bifurcating 型スプレイの配置からすれば、この Ss は右横ずれ剪断変形により形成されたものと想定される。したがって、これらの Ss もまた、その配置と剪断センスにおいて、Ss-II に相当する構造と見做される。

図版-14 a の Ss は、石英-黒雲母脈中に発達し、そのトレンドは隣接する SII-2b にほぼ平行である。この Ss のグラファイト充填クラックは、石英中では片麻構造に高角度をなし、黒雲母中ではへき開と粒界を利用し片麻構造に沿って発達し、雁行状配列と bend type のステップを形成して連結している。右横ずれ剪断を示唆する雁行状配列である。ここで、片麻構造に高角度をなすグラファイト充填クラックは R1 相当 (あるいは T 相当)、片麻構造に沿った短いグラファイト充填クラックは P 相当クラックと見做される。このように想定される剪断変形は、隣接する SII-2b のそれに調和する。したがって、この Ss も Ss-II に相当する構造と見做される。

上記以外の Ss にも、Ss-I あるいは Ss-II に対比される構

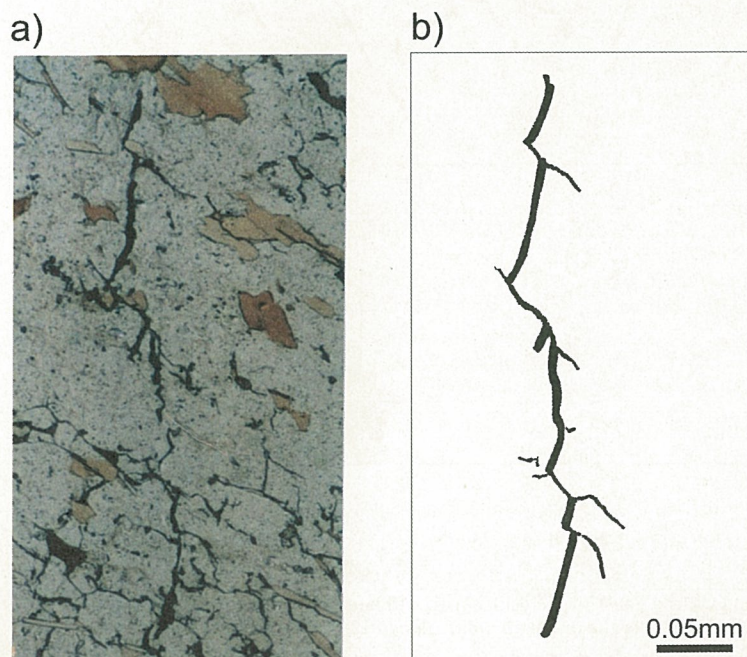


図-8 図版-3に見られる滑り面型のグラファイト充填クラックの顕微鏡写真とそのスケッチ

Fig. 8 Microphotograph and sketch of slip plane type (Ss) of graphite-filled cracks in Plate 3

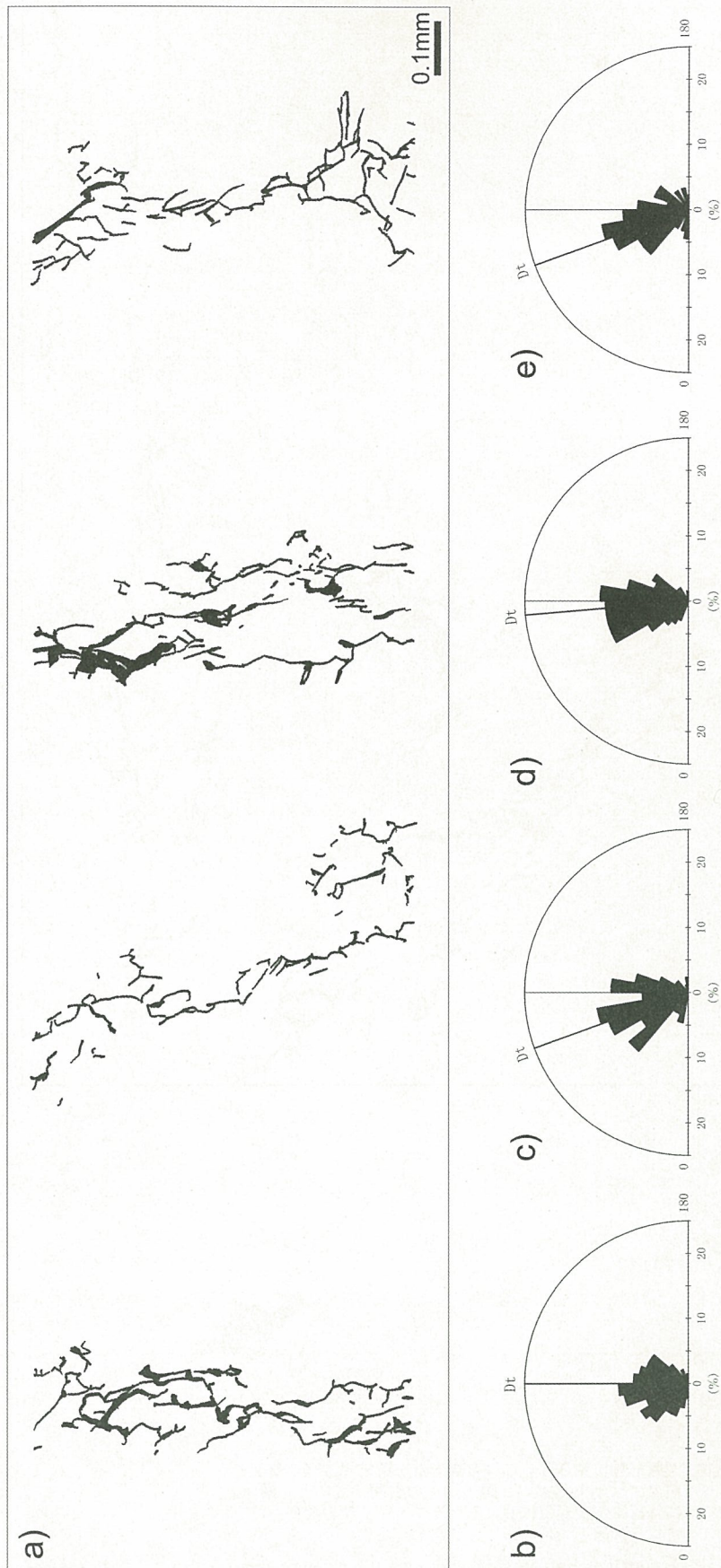


図-9 図版-15 aとその周囲に見られるグラファイト粒と4つの変形帯のスケッチ (a) と各変形帯におけるグラファイト粒の配列方位を示すローズ図 (b~e)

Fig. 9 A sketch of graphite grains in Plate 15a and its surroundings, showing four deformation bands (a), and rose diagrams illustrating their orientation direction in individual deformation bands (b-e)

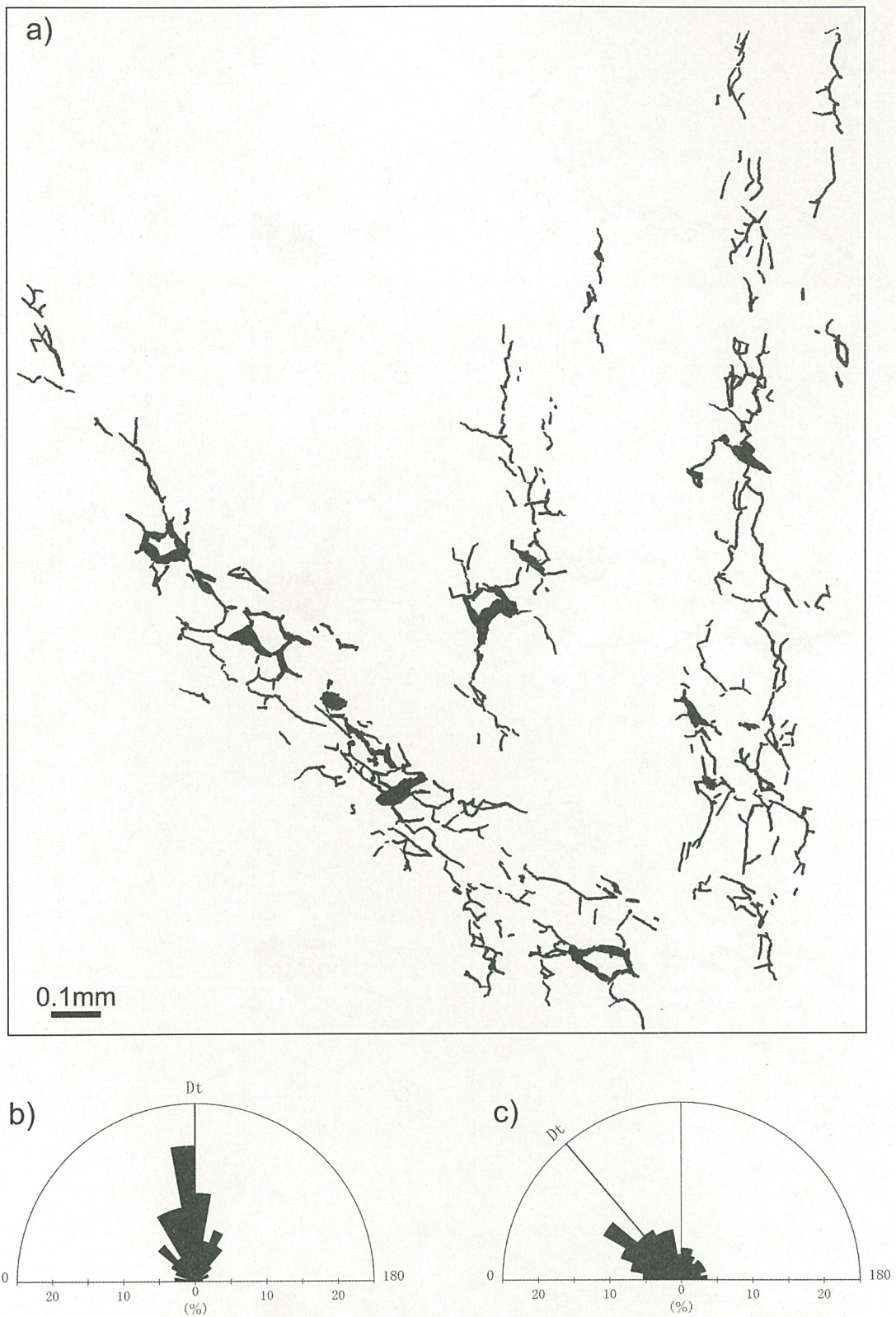


図-10 図版-16に見られる3つの変形帯を構成するグラファイト粒のスケッチ (a) と図-10 aの右端 (b) と左端 (c) に位置する変形帯におけるグラファイト粒の配列方位を示すローズ図

Fig. 10 A sketch of graphite grains forming three deformation bands in Plate 16, and rose diagrams illustrating their orientation direction within a deformation band of the right side (b) and that of the left side (c) of Fig.10a.

造特性を示すものがある。それらは図-2 aと2 bに記載されている。グラファイトには、結晶粒を横断するクラックを充填するもの (Ct) と結晶粒界に沿って分布するもの (Cg) とがある。Ssには、主としてCgからなるSs-Cgと、主としてCtからなるSs-Ctがある。図版-13 aのSs-Iの中央部の1つの平滑なグラファイト充填クラックは、2つの粗粒石英を横断しておりSs-Ctである (図版-13 b)。このSsのホーステイル型末端は、CgとCtで構成されている (図版-13 b)。

図版-3の中央部上端に見えるSs-IIは、その中央部もbifurcating型末端も、CgとCtの組合せで構成されている (図-7 a)。図-7 aではCtは赤色の線、Cgは黒色の線として示されている。図-8のSs-IIは、図-7 a (図版-3) の右上端にその末端が見えるが、CtとCgの組合せで形成されたSsであることが読み取れる。

Ctはクラックを充填するグラファイトであるが、Cgの起源には2つの可能性がある、クラックを充填するグラファイトである可能性と片麻構造を形成に関わる高温変成変形時相起源の可能性である。このため、Cgについては、2つの可能性の区分が必要である。本試料では、Ss-CtもSs-Cgもともに、CtとCgの連結によって形成されている。主断層セット-Iのトレンドにほぼ平行に発達するSs-Iでは、一般にCtが卓越しSs-Ctである。これに対して、図版-3中央部上端に見える片麻構造に沿って発達するSs-IIの例のように、Ss-IIでは、Cgの比率が高く、Ss-Cgと見做されるものが多い。しかし、CtとCgの連結によって面構造が形成されていることは、本試料では、Cgの多くが、粒界に沿ったクラック (grain boundary cracks) にグラファイトが析出充填したものであることを示唆している。

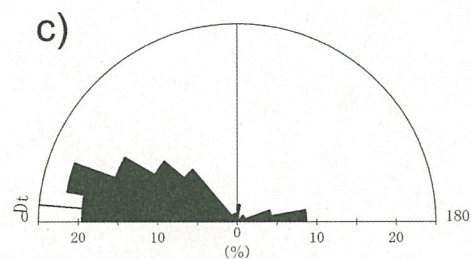
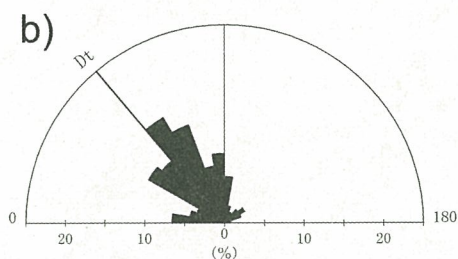
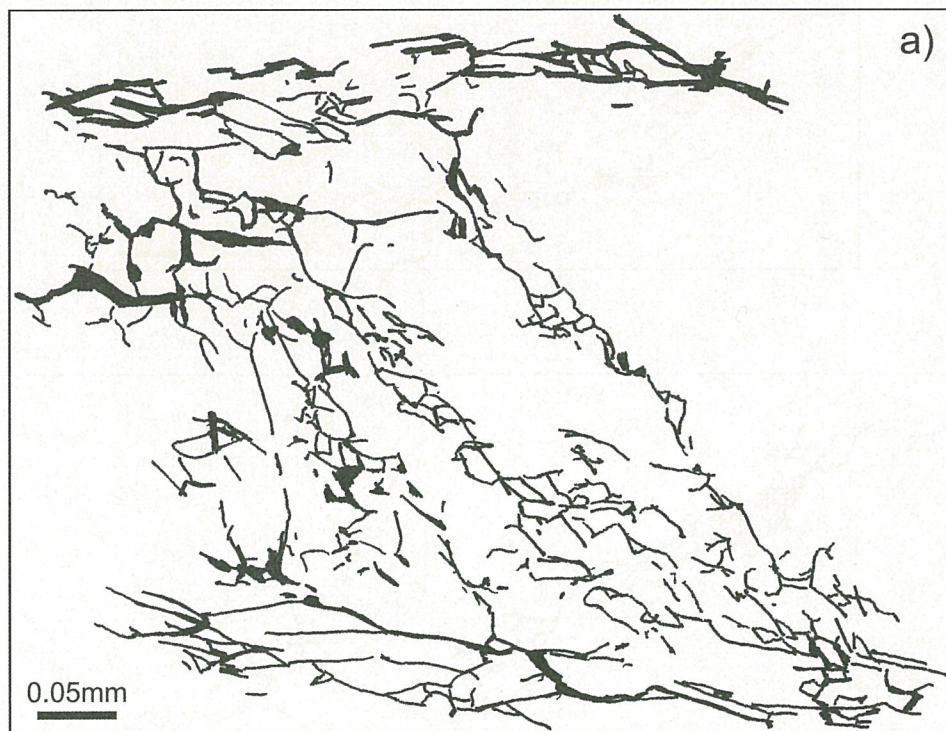


図-11 a) 図版-17 aとその周囲に見られるグラファイト粒と片麻構造に斜交する変形帯のスケッチ、b) 図-11 aの変形帯を構成するグラファイト粒の配列方位を示すローズ図、c) 図版-17 bの片麻構造に沿った変形帯を構成するグラファイト粒の配列方位を示すローズ図

Fig. 11 a) a sketch of graphite grains distributing within and around the deformation band oriented oblique to the gneissosity which is shown in Plate 17a, b) rose diagram illustrating their orientation direction within the deformation band of Fig.11a, c) rose diagram illustrating the orientation direction of graphite grains within the deformation band along the gneissosity which is shown in Plate 17b.

図-7 a (図版-3) でセット-Iとセット-IIが交差する領域には、セット-Iとセット-IIの鋭角二等分線に沿って、即ち主断層の形成に関わる応力場で最大圧縮応力 (σ_1) の作用方向に沿って発達する2つのSsがある。これらはSs-Ctであるが、剪断変形を示唆する構造特性を示さない。このようなSsは、その配置と剪断性を示さ

ない構造特性から、セット-Iとセット-IIの形成に関わる応力場で形成されたモードIクラックと見るのが妥当であろう。

図-7 bとcは、図-7 aの領域のCgとCtの配列方位についてのローズ図である。Ctの配列方位は、セット-Iとセット-IIの鋭角二等分線に沿った方向、即ち σ_1 方向

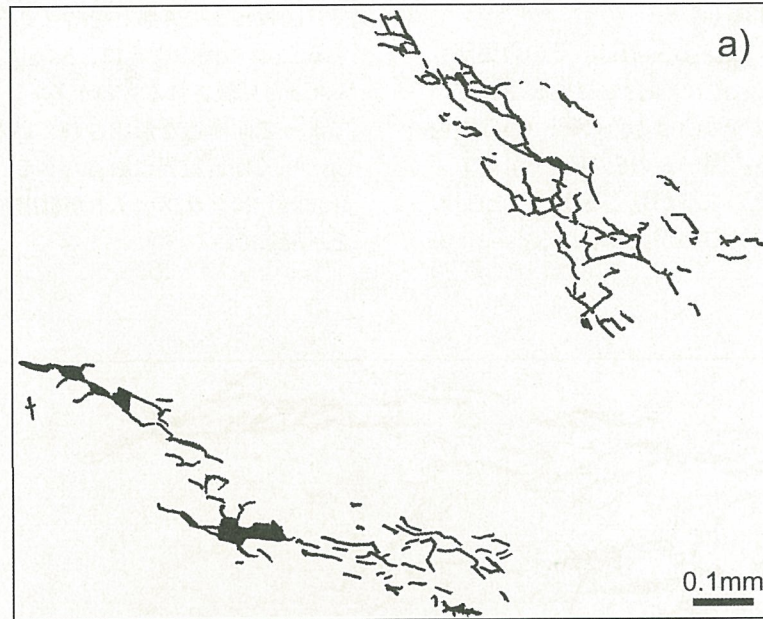


図-12 2つの領域で観察された4つの変形帯のスケッチ。a) 図-3の図-12aの領域の資料、b) 図-3の図-12bの領域の資料

Fig. 12 Sketches of four deformation bands observed in two areas. a) data from an area of Fig.12a shown in Fig.3. b) data from an area of Fig.12b shown in Fig.3.

のまわりに分散するが、 σ_1 に沿って卓越性が示している。Cgの配列方位は、Ctのそれより大きな分散を示すが、片麻構造に中～高角度をなすものが多い。これらの事実から、本試料のCgを構成するグラファイトの多くもまた、Ctとともに、初生的なものではなく、粒界に沿った微細クラックを充填したものと考えられる。このことは、次に記載される変形帯型からの情報によっても明らかになる。

(2) 変形帯型

変形帯型の面構造 (Sd) は、顕微鏡下で薄いグラファイトが多数集合する狭い帯として、その周囲から識別される構造である (図版-14b、15、16、17)。薄いグラファイトは、短く、うねうねとし、分岐し、多様な方位を示すが、密集してひとつの狭い帯を規定する。周囲より相対的に著しく高い密度でグラファイトが分布する帯である。図版-15aには3つの変形帯、図版-16 (図版-15b)には斜交する変形帯が示されている。これらの変形帯の周囲にグラファイトはほとんど認められない。

いずれの変形帯においても、帯を構成するグラファイトには、CtとCgが認められる。図版-15b、図版-17bのクロス・ニコル下で撮影された顕微鏡写真から明瞭に読み取れる。Ctが認められることは、変形帯が、構成鉱物粒の細粒化が起こった帯であることを示している。周囲より相対的に著しく高い密度でグラファイトが分布することは、これらの変形帯が、構成鉱物粒の細粒化が集中して起こり、移動してきた炭素が、形成されたクラック (開口クラック) にグラファイトとして析出充填した帯であることを意味している。変形帯にCtとCgが認められることから、変形帯での破碎は、滑り面型におけると同様、CtばかりではなくCgとしても起こったものと推定される。

変形帯では開口クラックはどのような方位をもって発達するのであろうか。図-9a、10a、11aとb、12は変形帯におけるグラファイト分布のスケッチの代表例である。図-9b～e、10bとc、11bとcは、これらの変形帯におけるグラファイトの配列方位を示すローズ図である。いずれの変形帯においても、分散はあるが帯のトレンドに沿った集中が認められる。

2つの薄片において観察される変形帯の分布位置は、図-2aと2bに示されている。先に述べたように、薄片-1で観察されるSd (Ss) の多くは (図-2a)、薄片-2においてSdあるいはSs (SsあるいはSd) として観察される。これらは、微弱ではあるが、主断層と同様、連続性のある面構造である。2つの薄片での位置からすれば、SsとSdの間には位置により性状の変化 (Ss \leftrightarrow Sd) があることが想定される。

変形帯の多くは直線的であるが、僅かな湾曲を示すものがある。黒雲母の多いところでは変形帯は片麻構造に沿って発達するが (図版-14b、17)、黒雲母の少ないところでは、変形帯の多くはセット-I、セット-IIとほぼ同じトレンドをもって発達する。黒雲母の多いところと

黒雲母の少ないところが互層するところでは、変形帯は屈折する (図版-17a)。 σ_1 の方向に発達するものもある (図-2a、図版-15b、16)。したがって、変形帯には、セット-I、セット-II、モードIISsに対応する配置での変形を示すものと、モードISsに対応する配置での変形を示すものがあると言ふことが出来る。したがって、上記の変形帯におけるグラファイト充填クラック分布は、セット-I、セット-II、モードIISsに対応する配置の変形帯では、帯に沿った剪断変形の言葉、モードISsに対応する配置の変形帯では、帯に平行な最大圧縮応力の作用の言葉で説明されるべきものと考えられる。

しかし、このような説明だけでは、変形帯における開口クラックの発達様式 (=グラファイト分布のパターン) (図-13) と、セット-I、セット-II、モードIISs、モードISsにおけるそれとの相違が何故生ずるのかは理解出来ない。例えば、セット-I、セット-II、モードIISsのグラファイト充填クラックでは、極めてシンプルにA型クラックで形成されているものがある (図版-5、8、10、13)、R1 (あるいはT) クラック主体で形成されているものがある (図版-6a (b))、明瞭なR1 (あるいはT)、Pとその連結で形成されているものがある (図版-6a (b))、明瞭なT、Pとその連結で形成されているものがある (図版-7)。これらには、図-13 (図版-15、16、17) のようなグラファイト充填クラックのもやもやとした分布は見られない。上記の相違は、変形の増大に伴い、変形帯からモードIISs、そしてセット-I (セット-II) へと進行したという言葉では説明出来ないものである。グラファイトの出現を基準にすれば、変形は多様な様式で、同時発生したものと考えられる。

3. 2 ダメージ帯の広がりと言形様式

(1) ダメージ帯に見られる変形様式

セット-I、セット-IIが、本試料に見られる主断層であることからすれば、モードIISs、モードISs、変形帯は、主断層を取り巻く領域、主断層間の領域におけるダメージの広がり、その性状を示すものと考えられる。本試料では、図-2に示されたセット-I、セット-II、モードIISs、モードISs、変形帯以外の領域にも、多量のグラファイトが不均質に分布する (図版-1、2、図-6)。この不均質分布は、セット-I、セット-IIの形成時のダメージの広がりを反映したものと考えられる。この章ではこのグラファイトの不均質分布から読み取れるダメージの広がりとその性状が検討される。

図-6は、図版-1の一部 (右側中央～下部) におけるグラファイト粒を、拡大顕微鏡写真からスケッチしたものである。図において周囲に対して相対的にグラファイトの分布密度が高くなっている領域が識別される。この高密度領域が、幅広く帯状の広がりとして辿れるところを、図-6に、ピンク色で示した。高密度領域 (帯A～帯G) のトレンドは、多くの位置で片麻構造のトレン

ドに斜交し、セット-I、セット-IIに沿って分布する。このような帯A~帯Gの分布パターンは、セット-I、セット-IIに規制された構造であるように見え、帯中のグラファイトが、セット-I、セット-II断層の形成に関わる応力場で出現した微細クラック群に析出充填したものであるという印象を与える。帯A~帯GにはCtが広く分布するこ

とからすれば、この印象は妥当なものである。この問題の検討は、明らかにダメージ帯の広がりへの検討である。関連する事実を記載しよう。

図-6の帯Aの下半部に図版-17の2つの変形帯が含まれる。図版-18aは、これらの変形帯より下位の帯Aの顕微鏡写真である。図版の右上半部が図-6に示され

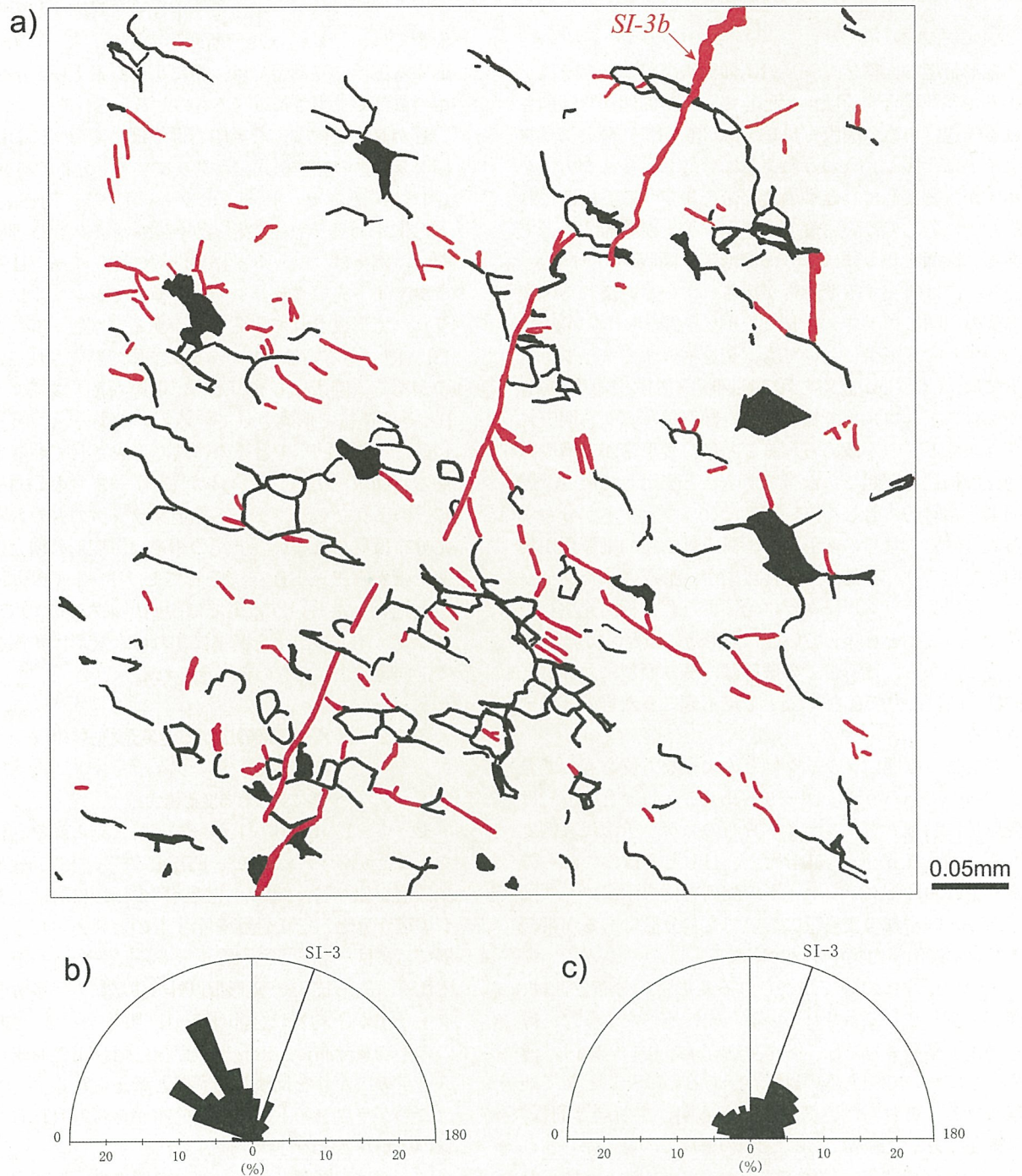


図-13 a) 図版-19aに見られるグラファイト粒、Cg(黒線)とCt(赤線)、のスケッチ、b) Ctの配列方位を示すローズ図、c) Cgの配列方位を示すローズ図。SI-3: SI-3bの第二面構造の平均トレンド

Fig. 13 a) a sketch of graphite grains, Cg (solid lines) and Ct (red lines), observed within Plate 19a, b) rose diagram illustrating the orientation direction of Ct, c) rose diagram illustrating the orientation direction of Cg. SI-3: average trend of the second order planar structure of the SI-3b.

た帯A、その左下半部がその外側のグラファイトがほとんど認められない領域である。図版の左下半部には、粗粒グラファイトを除けば、グラファイトはほとんど認められない。ここでは、黒雲母の示す片麻構造以外に、変形構造は認められない。これに対して、図版の右上半部の帯Aは、グラファイトの高密度分布域である。ここでは、細粒グラファイトと片麻構造に沿った著しく粗粒のグラファイトが識別される。細粒グラファイトにはCg、Ctとしてのグラファイトが、片麻構造方向とともに、それに低角度で斜交する方向に、弱くはあるが明瞭な面構造を形成して発達している。この面構造の片麻構造に対する斜交センスは、時計廻り低角度である。いまひとつ特徴的な微細構造は、薄いグラファイト・フィルムで粒界が取り巻かれた結晶粒の集合するプールである。このような微細構造は、帯Aの外側では全く認められないのである。

図版-18aの帯Aのグラファイトの形成する上記のような微細構造は、図版-17の変形帯の示す構造でもある。変形帯では、片麻構造に対して低角度斜交の面構造がより顕著であり、薄いグラファイト・フィルムで粒界が取り巻かれた結晶粒の集合するプールもシャープである。細粒グラファイトが形成するこのような構造は、帯A(図版-17と18を含む帯)全体を通して発達する。

次に帯Bに見られる細粒グラファイトが形成する微細構造を検討しよう。帯Bでは帯内に変形帯を含まない。図版-19aが、帯Bの1部(図-3)の拡大顕微鏡写真である。図-13aは図版-19aの領域における、グラファイト分布のスケッチである。CtとCgに分けて示されている。図版中央の高角度左下がりのA型CtはSI3である。図-13bとcは、SI3を構成するグラファイト充填クラックを除く、CtとCgの形態配列の方位を示すローズ図である。図-13bから、Ctの配列方位に分散があるものの、2つの卓越方位をもって配列し、卓越方位のひとつが片麻構造にほぼ平行であり、いまひとつが片麻構造に低角度斜交であることが読み取れる。低角度斜交のセンスは、帯Aにおいて観察されたもの(例、図版-17と18a)と同じである。CgでもCtの卓越方位に集中が認められる(図-13c)。しかし、分散はより大きく、CgはCtのようなバイモダル分布を示さない。これはCgが粒界に沿ってうねるためであり、グラファイト・フィルムで粒界をコートされ分離した石英粒、長石粒のプール状集合が形成されているからである(図版-19a、図-13a)。このような粒界のほとんどが、ここではCgである。図-13と同じようなCtとCgの配列パターンは帯Bを通して観察される。しかし、帯Bの下半部(図-6)は、片麻構造に低角度斜交のCtとCgが、より卓越性をもって発達しており、むしろ帯Aに近い特徴を示している。

帯Cは、図-6の範囲内では、近接分布する2つの変形帯からなる帯である(図-2a)。変形帯の下半部は片麻構造に低角度で斜交する。片麻構造に対する斜交センスは、帯Aの図版-17aの変形帯の示すそれと調和的

である。この2つの変形帯上半部は片麻構造に沿うように発達するが合体し、帯Cの下部に移行する。帯Cは、SII-2bに沿うように左上方に向かって連続発達するが、SII-3b末端から左上方に向かってのびる高密度帯とも合体する(図-6)。帯Cは、図-6の範囲を越えた左上方では、2つの変形帯からSII-3b末端までを含む幅となって、図版-3(図-7a)の右端まで連続発達する。この末端は図-8の従属断層末端を少し越えている。帯Cは、図版-3の右端、図版-13a(b)の従属断層上部末端から上、図版-18b、図版-9aの右上端に顕微鏡写真として示されている。

顕微鏡写真からも読み取れるように、帯Cのグラファイト、Cg、Ct、の形成する構造は、先に解析した帯Bの図版-19a(図-13a)でのそれに比較される特徴を示す。グラファイトは、うねうねし、連結しあい複雑な構造を形成するが、その配列方位は、片麻構造方向とそれに低角度で斜交する方向で卓越している。連結しあうグラファイトは、石英粒、長石粒の粒界に沿ったグラファイト・フィルムとして、それらを個々の粒子に分離する。図版-18bには、グラファイト・フィルムで粒界をコートされ分離した石英粒、長石粒の集合する小さなプールが散在する構造が明瞭である。全体ではないが粒界のかなりの部分を薄くでもコートされた石英粒、長石粒の集合するプールということであれば、図版-3の右端、図版-13a(b)の従属断層上部末端から上、図版-18b、図版-9aの右上端など帯Cのすべての顕微鏡写真で認められる。

帯Dは粗粒黒雲母の分布形態によって規定され近接分布する3つの変形帯を含む帯である(図-2a、6、図版-14b)。しかし、帯Dは、帯Aと同様のセンスで片麻構造に低角度で斜交し、SII-2bに沿って発達する(図-6)。グラファイトは黒雲母のへき開・粒界を通して、片麻構造に沿うように連結する。黒雲母がなく石英と長石からなるところでは、グラファイトにはCtとCgが認められ、帯Bで見られたような、片麻構造方向とそれに低角度で斜交する方向の面構造を形成する(図-6、図版-11a)。

帯Eは幅狭く、片麻構造に高角度で斜交し、SI-4に沿って発達する。帯Fは下部で2方向へ分岐する。左側の分岐帯は、SI-4に沿って発達し、片麻構造に高角度配置である。分岐部より上の帯Fは、右側の分岐帯とともに、うねりながら一連の構造を形成する。このうねりは、SI-4とSII-3aの鋭角二等分線方向配置の高密度帯が、片麻構造に沿ってステップすることによっている。帯Fのグラファイトの形成する微細構造は、分岐部を除けば、鋭角二等分線方向と片麻構造方向で大きく異なることはない(図版-19b)。帯Fの左分岐帯でも同じである。基本的に同じ特徴をもつ微細構造が帯Eでも観察される。これらの帯では、グラファイト(CtとCg)は片麻構造に沿った面構造を形成するが、帯を特徴づける微細構造は、グラファイト・フィルムで分離された石英粒、長石粒が、

円礫を積み重ねた石垣のような構造である(図版-19b、図-6)。このため、グラファイトの薄片面上での配列を検討したローズ図は、特定の方位へ卓越性を示さない(図-14)。帯Fの分岐部の構造は、片麻構造に沿った著しく粗粒のグラファイトによって規定されている。

SII-3aにそった幅狭い帯Gは、上端部は高密度帯であるが、それより下位ではグラファイトの密度は低くなっている。しかし、帯G全体を通して観察される微細構造は、同じ特徴を呈し、帯Bのそれに比較されるものである。

以上に示したように、帯A~帯Gに分布する微細グラファイトはCtとCgである。高密度帯がセット-IIに沿うような配置にある帯A、帯B、帯C、帯D、帯Gを特徴づける微細構造は、グラファイトが片麻構造に沿った面構造と片麻構造に低角度で斜交する——時計廻りに測定——面構造が発達することである。いまひとつは、グラファイト・フィルムでコートされた石英粒、長石粒が集合するプールの形成である。グラファイト・フィルムでコートされた石英粒、長石粒は、この面構造に沿うように形態配列を示す傾向がある。これらの帯を、セット-I(図版-19a)、Ss(図版-3、18b)が横断するところでは、グラファイト・フィルムでコートされた石英粒、長石粒の形態配列は、場所によって変化し一定の方向への定向配列は認められない。

高密度帯がセット-Iに沿った方向に発達する帯E、帯Fの左側分岐部と、セット-Iとセット-IIの鋭角二等分線方向配置の帯Fでは、片麻構造に低角度で斜交する——時計廻りに測定——面構造は認められない。これらの帯は、片麻構造に沿ったグラファイトの配列によって規定される面構造と、グラファイト・フィルムでコートされた石英粒、長石粒が集合するプールの形成によって特徴づけられる。これらの帯では、後者の現象が特徴的であり、全体を通して、グラファイト・フィルムで分離された石英粒、長石粒が、円礫を積み重ねた石垣のような構造が認められる(図版-19b、図-6)。

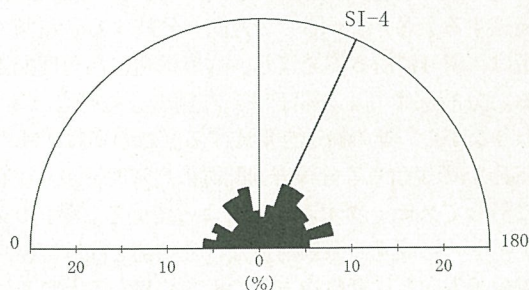


図-14 図版-19bの高密度帯で見られるグラファイト粒の配列方位を示すローズ図。SI-4: 図版-19bで観察されるSI-4の第二次面構造の平均トレンド

Fig. 14 Rose diagram illustrating the orientation direction of graphite grains in the high-density domain observed in Plate 19b. SI-4: average trend of the second order planar structure of the SI-4 observed in Plate 19b.

(2) ダメージ帯の広がり

クラックを充填するグラファイトの存在は、グラファイト充填断層としてのセット-I、セット-IIの形成に関わる応力場での変形の結果であるとすれば、クラックを充填するグラファイトを、変形の広がりを推定するためのインデックスとして使用することは妥当であると考えられる。先に解析したように、本試料には、粒界に沿ったフィルムとしてのグラファイトCgと、鉱物粒を切断するクラックを充填するグラファイトCtがある。Ssと変形帯では、CtとともにCgもまた変形の所産であることが示された。しかし、Cgには変成鉱物としてのグラファイトが含まれる可能性があることから、ここでは、Ctのみを、セット-I、セット-IIの形成に関わる応力場での変形の広がりを求めるためのインデックスとして使用することとし、Ss、変形帯、高密度帯以外の領域でのダメージの広がりを描くことを試みた。その結果を図-6に示す。Ctは、一つ一つを個別的に示すのではなく、接近分布するCtは一括してそれらを含む領域として示した。このようにして現われたCt分布域を低密度帯(図-6の黄緑色の領域)と呼ぶことにする。このような低密度帯の広がりは、主断層間の領域の岩石が、広くダメージを受けるものであることを示唆する。しかし、Ctは分散して分布するため、現段階では、それらの総体が形成する変形構造の特徴を具体的な言葉で説明することは可能でない。

4. 考察と結論

以上において解析記載した本試料に発達する断層(セット-I、セット-II)とその周辺領域に形成される微細変形構造の特徴を要約し検討しよう。

断層現象は、基盤岩中を移動する流体から、クラックにグラファイトが析出出来る条件下で起こった。その直後に同じ応力場で、グラファイト充填断層をなぞるようにして出現したより微弱なクラックに、白色葉片状鉱物の析出が起こっている。本ボーリングでは、他深度のコア(花崗岩)でも、同じような脆性的変形史、グラファイト充填断層の形成→白色葉片状鉱物断層の形成、が確認されている(図版-12a)。高温変成帯の変形史の中で、脆性的に変形シカタクレーサイトが形成される条件下で、岩体中を移動する流体からクラックに、グラファイトが析出する現象は知られていることである(e.g. Zulauf et al., 1990²⁰)。

本試料の主断層(セット-I、セット-II)は、約45°で交わる共役断層である。断層を構成する微細構造から推定される断層に沿った剪断センスから、その鋭角二等分線方向に、その形成に関わる最大圧縮応力 σ_1 の作用方向が位置するものと結論される。断層を構成する微細構造は、グラファイトの充填するクラックから読み取れるもので、良く保存されている。石英-長石粒集合部をほぼ直線的に切断する主断層は、一般に黒雲母に接するところで黒雲母粒界に沿って屈折しシフトしている。すな

わち、本試料の主断層は、成長の初期段階を示し平滑な through-going fault の出現段階に達していないものである。

本試料の主断層（第一次面構造）は、第二次の面構造と第三次の面構造で形成されている。第二次面構造は1～数mmの長さでR1相当の雁行配列を示す。第三次面構造は第二次面構造の内部構造を形成するグラファイト充填クラック群である。内部構造には3つの型が識別される：A型＝第二次面構造に沿った長いグラファイト充填クラックで、1枚～数枚が平行配列する型、B型-1＝短いR1相当グラファイト充填クラック群、P相当グラファイト充填クラック群、R1-P相当クラックの連結によるギザギザしたY相当グラファイト充填クラックで構成される型、B型-2＝短いT相当グラファイト充填クラック群、P相当グラファイト充填クラック群、T-P相当クラックの連結によるギザギザしたY相当グラファイト充填クラックで構成される型。B型でR1相当かT相当かの識別は、第二次面構造の平均トレンドに対するグラファイト充填クラックの角度——T相当は約40°、R1相当は約20°以下——によっている。しかし、20°以下の低角度でT相当クラックが形成されないという保証はない。A型の長いR1（あるいはT）が形成される場所では、P相当クラックは、片麻構造に沿ったbend typeステップを形成するものとして見られ、その発達は微弱である。

これらのクラック群の形成過程のどの段階で、クラックの開口とグラファイトの充填が起こったのかは明らかでない。Y相当クラックが、R1（あるいはT）-P相当クラックの連結によるものであることからすれば、Y相当クラックの開口時に、既存のR1（あるいはT）、P相当クラックの開口があったことは確かである。

A型の長いクラックが形成される場合、B型-1の短いクラックが形成される場合、B型-2の短いクラックが形成される場合がある。これが、どのような物理的条件の反映であるのかは明らかでない。B型-2のクラックが形成された位置は石英のみで構成される石英脈であり、B型-1のクラックが形成された位置の構成鉱物には一般に石英・長石・黒雲母が認められる砂質片麻岩である（図版-7、5a、8）。しかし、図版-5bで、粗粒石英を切断するグラファイト充填クラックは、共役配置であり、一方のセットはSI4に含まれるA型クラックである。しかし、ここでのA型クラックは砂質片麻岩から連続的な構造である。本試料内でのA型クラック、B型-1クラックは砂質片麻岩から発生し、B型-2クラックは石英脈から発生したように見える。しかし、3者の形成条件は明らかでない。また、クラックの長さには、A型クラックとB型クラックの間で、10:1以上の違いを示すものがある。このような相違が出現する条件を明らかに出来る情報が認められていない。数cm四角の狭い薄片の範囲で、変形に関わる物理的条件に変化があったことは明らかである。

本試料は砂質片麻岩と石英脈であり、黒雲母の形態定向配列によって規定される片麻構造が発達する。片麻構

造は、主断層（セット-I、セット-II）の交差線にはほぼ平行であり、主断層の形成に関わる σ_1 に対して約45°の角度をなしている。片麻構造に高角度をなすセット-IIは、平滑でホーステイル型末端を示す。同様の末端構造は従属断層Ss-Iでも観察される。これに対して、セット-IIは片麻構造に低角度であり、ところどころで片麻構造に収斂しうねりを示す。セット-IIの末端は、片麻構造に沿うようにbifurcating型の構造を示す。同様の末端構造は、セット-II方向の従属断層Ss-IIにも特徴的である。片麻岩には片麻構造に依存した力学強度異方性がある（e.g. Deklotz et al., 1966¹⁸；阿部ほか、2003¹⁹）。黒雲母の増加は片麻構造に沿った力学強度を低下させる。セット-IIの片麻構造への収斂と片麻構造に沿ったbifurcating型末端の形成は、片麻構造に沿った力学強度の低下の反映であろう。

岩石鉱物中の微細クラックについて総括的な検討を行なったKranz (1983)²⁷は、intracrystalline cracksについて「Based on post-deformation observations, most stress-induced cracks appear to be extensional, Mode I type cracks (Tapponnier and Brace, 1976²⁸; Kranz, 1979²⁹; Wong, 1980³⁰), with little shear motion between the crack surfaces」と述べ、intercrystalline cracksについては「In mechanically stressed rocks, the tip-to-tip intercrystalline crack orientations are usually subparallel to the macroscopic maximum stress direction」と述べている。Kranz (1983)²⁷はまた、「Frequently observed cleavage cracks occur in quartz along r, z directions (e.g. Swolfs, 1972³¹; Martin and Durham, 1975³²; Dunning, 1978³³), …… Cleavage planes in crystals are generally those planes with the lowest bond density or strength, and lowest surface energy (Brace and Walsh, 1962³⁴, supporting theory of Gilman, 1959³⁵). Thus in suitably oriented grains, strain energy stored in the grains as a result of applied stress will tend to be relieved on those planes first」と述べている。Peng & Johnson (1972)²²、Haußbauer et al. (1973)²³、Wong (1982)²⁴、Menendez et al. (1996)²⁵、Moore & Lockner (1995)²¹、Lajtai (1998)²⁶による実験は、石英中に形成される初生的クラックは、モードIのaxial cracksであることを示した。

本試料に見られる断層現象は、上記引用の既往研究の成果とは異なっている。本試料では、主断層に沿った石英に波動消光が認められる。岡野ほか (2001)⁶、妹尾ほか (2002)⁷、斎藤ほか (2003)⁸が記載した試料は、石英がbrittle-ductile transition近傍で変形した場合であることを示唆するものであった。本試料の断層現象は、上記引用のそれと同一時相の変形作用である。したがって、本試料についても、石英の変形条件がbrittle-ductile transition近傍にあることの反映である可能性が考えられる。Peng & Johnson (1972)²²、Haußbauer et

al. (1973)²³⁾、Wong (1982)²⁴⁾、Menendez et al. (1996)²⁵⁾、Moore & Lockner (1995)²¹⁾、Lajitai (1998)²⁶⁾ による実験の変形条件は、brittle-ductile transition 近傍ではなく脆性場である。本試料に見られる断層現象が、これらの研究者が実験を基礎に示唆してきた断層の微細機構と異なるのは、変形条件が全く異なっていることの反映である可能性が考えられる。

本試料の主断層は、第二次面構造のレベルでは、第一次面構造に対して低角度 (20~7°) のクラックの出現段階にあり、その構造の破壊をもたらす他方位のクラックの出現は認められず、片理構造に沿った微弱な bend type のステップを形成して発達するにすぎない。第二次面構造は、黒雲母に接した位置で屈折とシフトを示し、一般にほとんど変位を示さない。主断層末端の第二次面構造は、ホーステイル型配置のクラック群である。主断層の形成に関わるプロトシア・ゾーンは、その内部に雁行配列する第二次面構造 R1 (あるいは T) を形成し、プロトシア・ゾーンの末端でシアゾーン末端特有の歪み場を反映してホーステイル型配置のクラック群を形成したものと考えられる。

第三次面構造を有する第二次面構造は、R1 相当プロトシア・ゾーンであり、第三次面構造は、このプロトシア・ゾーン内部に形成された R1 あるいは T である。P 相当の第三次面構造は、この第二次面構造形成の後期にわずかに形成された T 相当グラファイト充填クラックである可能性がある。図版-7 の P 相当グラファイト充填クラックは T 相当グラファイト充填クラックに規制されて形成されているように見える。brittle-ductile transition 近傍で石英に出現するクラックがモード II に限られるのかモード II を含むかが問題として残されているように見える。この問題は岡野ほか (2001)⁶⁾、妹尾ほか (2002)⁷⁾、斎藤ほか (2003)⁸⁾ が示した情報を合せて議論されるべきことであろう。今後の課題である。それには、プロトシア・ゾーン内に、そのトレンドに低角度 (20~7°) をなす方向からの圧縮応力の作用する可能性、条件の理論的解析もまた必要であろう。

本試料が提示した情報は、断層は、その先端のプロセス・ゾーンの変形を先駆として成長するものであり、断層近傍のダメージ帯は、その痕跡であるという仮説と調和しない。即ち、「Damage zone geometry around faults can provide information on how faults propagate and are arrested. The growth of faults in rocks has been studied in laboratory experiments where tensile fractures are developed in the damage zone ahead of a propagating tip」(McGrath & Davison, 1995⁹⁾, p. 1011) という説明は、本試料の主断層の示す構造に対応しない。断層の末端はプロトシア・ゾーンの末端に対応し固有であり、断層のセンターはプロトシア・ゾーンのセンターと対応すると考えることによって説明出来る構造であろう。

このような、主断層群に囲まれた領域の母岩にも変形がある。それが、ここで、ダメージと呼んで記載してき

た変形である。先頁で、滑り面型、変形帯型、高密度帯、低密度帯として識別し記載したものである。これらの多様な変形構造の共通項は、「クラックが形成され開口し、グラファイトが析出充填する」という現象である。これは主断層 (セット-I、セット-II) にも共通する現象である。岩体中を移動していた流体から炭素がグラファイトとして析出しクラックを充填した時相が、セット-I、セット-II の形成時相に限定されるのであれば、滑り面型、変形帯型、高密度帯、低密度帯として識別し記載した変形構造は、セット-I、セット-II 形成時相に岩石中に出現したクラックの広がり性状を示すものと言うことが出来る。断層時相における開口クラックの出現としての変形現象は、セット-I、セット-II という限定された狭い帯に限られず、その母岩全体に多様な性状と多様な密度分布をもって発達する現象であると言うことになる。

変形帯はセット-II とほぼ同じ配置のものが卓越して発達する。ここで見られるグラファイト充填クラックが形成する変形構造は、片麻構造に沿った剪断場での片麻構造に低角度をなすグラファイト充填クラック群の形成と片麻構造に沿ったグラファイト充填クラック群の形成である。片麻構造に沿った剪断センスは、セット-II と一致する。同様の現象は、セット-II に沿った配置の高密度帯においても観察される。変形センス、変形の進行度、グラファイト充填という類似性から、変形帯・高密度帯の形成とセット-II の形成を同一時相の現象と見做すことが妥当のように見える。

変形帯・高密度帯の形成というクラック群をもたらす変形が先駆現象としてあって、セット-II の形成が起こったという可能性も考えられる。しかし、図版-5、図版-6 a (b)、図版-7、図版-8、図版-10 で見られるように、セット-I、セット-II に直接する領域には、グラファイトはほとんど認められない。変形帯、高密度帯はともに主断層から離れた位置にある (図版-15、図版-16、図版-17、図-6)。先駆現象ではない。

変形帯・高密度帯の形成をより後期の変形作用の所産と見ることに無理があろう。

変形センス、変形の進行度、グラファイト充填という類似性から、変形帯・高密度帯の形成、したがってまた低密度帯の形成と、主断層の形成を同一時相の現象と見做すことが妥当のように見える。即ち、図-6 の低密度帯までのグラファイト充填クラック分布は、主断層形成時に岩石中に発生した開口クラック分布を示すと考えられる。更に重要な事象は、変形帯の高密度帯には、グラファイト・フィルムでコートされた斜長石・石英粒のボールが多数形成されていることである。これは結晶粒界の開口が、主断層間領域での主要な変形機構だということである。それはまぎれもなく岩石の膨張の変形であるが、それにはグラファイトの析出に関する流体による hydrofracturing による可能性も考えられる。

変形帯、高密度帯、低密度帯におけるグラファイト

充填クラックの形成する構造は、主断層から離れた領域、主断層間領域では、主断層とは異なる様式で多くのクラックの集合体が形成され、岩石は全体としてダメージを受けるものであることを示唆するものと結論されよう。

ここで明らかにされた断層現象に伴い岩石中に形成される開口クラック分布は、断層過程における岩石中の流体移動の性状の理解にとって極めて重要な情報であると考えられる。

参 考 文 献

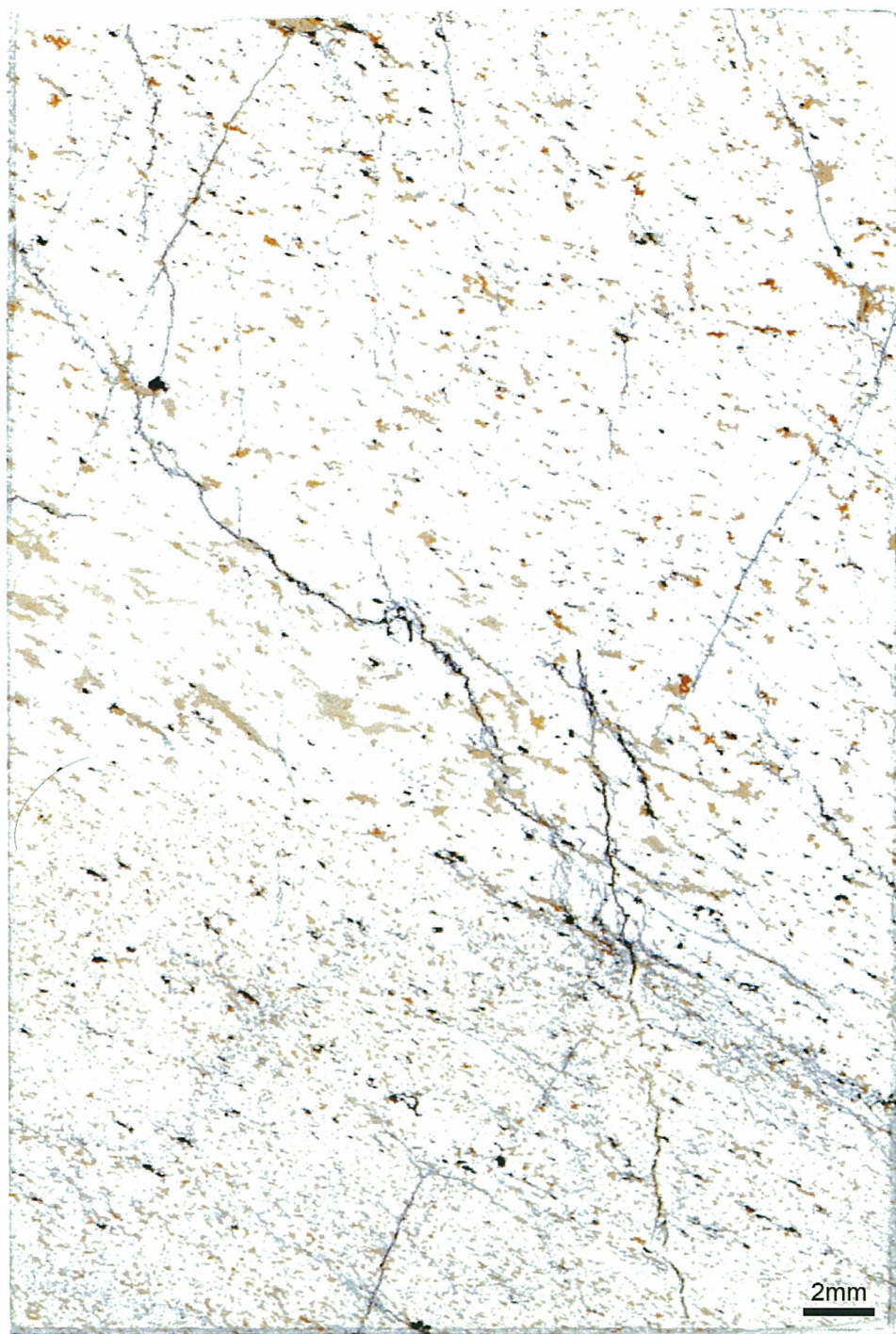
- 1) Chester, F. M. and Logan, J. M. (1986): Composition planar fabric of gouge from the Punchbowl Fault, California. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 9, pp. 621~634.
- 2) McGrath, A. G. and Davidson, I. (1995): Damage zone geometry around fault tips. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 17, pp. 1011~1024.
- 3) Shington, Z. K. and Cowie, P. A. (2001): Damage zone and slip-surface evolution over μm to km scales in high-porosity Navajo sandstone, Utah. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 23, pp. 1825~1844.
- 4) Antonellini, M. and Aydin, A. (1994): Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: petrophysical properties. *AAPG Bull.*, Vol. 78, pp. 355~377.
- 5) Aydin, A. and Johnson, A. M. (1978): Analysis of faulting in porous sandstones. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 5, pp. 19~31.
- 6) 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.
- 7) 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. 22, pp. 85~116.
- 8) 斎藤拓哉, 三本健四郎, 山根 誠, 岡野 肇, 吉田 浩, 妹尾洋一, 原 郁夫 (2003): 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, 応用地質技術年報, No. 23, pp. 91~111.
- 9) Araya, T., Okano, H., Abe, Y., Yamane, M. and Hara, I. (2004): Geology of the 1350m boring cores from the OYO CORPORATION TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER (5): Segmentation and linkage of schistosity-parallel faults, 応用地質技術年報, No. 24, pp. 17~37.
- 10) Riedel, W. (1929): Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zent. Min. Geol. Pal.*, pp. 354~368.
- 11) Skempton, A. W. (1966): Nature and origin of kink bands. *Tectonophysics*, Vol. 1, pp. 459~494.
- 12) Tchalenko, J. S. (1970): Similarities between shear zones of different magnitudes. *Bull. GSA*, Vol. 81, pp. 155~160.
- 13) 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. *Proceedings of Conference VIII, Analysis of actual fault zone in bedrock. US Geol. Surv., Menlo Park, California*, pp. 305~343.
- 14) Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpestein, C. H. K. (1986): Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 7, pp. 737~752.
- 15) Moore, D. E., Summers, R. and Byerlee, J. D. (1986): The effect of sliding velocity on the frictional and physical properties of heated fault gouge. Wang, C.-Y. (ed) "Internal Structures of Fault Zones" Birkhauser Verlag, Basel, pp. 31~52.
- 16) 原 郁夫 (1998): 「褶曲の見方」。深田地質研究所ライブラリー No. 11, 財団法人深田地質研究所, 東京, p.225.
- 17) Childs, C., Nicol, A., Walsh, J. J. and Watterson, J. (1996): Growth of vertically segmented normal faults. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 18, pp. 1389~1397.
- 18) Deklotz, E. J., Brown, J. W. and Stemler, O. A. (1966): Anisotropy of a schistose gneiss. *Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, 1, pp. 465~470.
- 19) 阿部康則・安江勝夫・原 郁夫 (2003): 飛驒トンネルの地質断面解析 (2): カタクレーサイト化した片麻岩・片麻状花崗岩の一軸圧縮強度異方性. 応用地質技術年報, No. 23, pp. 55~90.
- 20) Zulauf, G., Kleinschmidt, G. and Oncken, O. (1990): Brittle deformation and graphitic catclasites in the pilot research well KTB-VB

- (Oberpfalz, FRG). Knipe, R. J. and Rutter, E. H. (eds) "Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics" Geol. Soc. (London) Spec. Publ., No. 54, pp. 97~103.
- 21) Moore, D. E. and Lockner, D. A. (1995): The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 17, pp. 95~114.
- 22) Peng, S. S. and Johnson, A. M. (1972): Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, pp. 37~86.
- 23) Haullbauer, D. K., Wagner, H. and Cook, N. G. W. (1973): Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.*, 10, pp. 713~726.
- 24) Wong, T.-F. (1982): Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 4, pp. 407~423.
- 25) Menendez, B., Zhu, W. and Won, T.-F. (1996): Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Barea sandstone. *Jour. Struc. Geol.*, Vol. 18, pp. 1~16.
- 26) Lajitai, E. Z. (1998): Microscopic fracture processes in a granite. *Rock Mech. Rock Engineering*, Vol. 31 (No. 4), pp. 237~250.
- 27) Kranz, R. L. (1983): Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, Vol. 100, pp. 449~480.
- 28) Tapponnier, P. and Brace, W. F. (1976): Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.*, Vol. 13, pp. 103~112.
- 29) Kranz, R. L. (1979): Crack growth and development during creep of Barre granite. *Int. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 16, pp. 23~35.
- 30) Wong, T.-F. (1980): Post-failure behavior of Westerly granite at elevated temperatures. Ph.D. Thesis, Massachusetts Inst. Tech., Cambridge, Massachusetts.
- 31) Swolfs, H. S. (1972): Chemical effects of pore fluids on rock properties. *AAPG Memoir* 18, pp. 224~233.
- 32) Martin, R. J. and Durham, W. B. (1975): Mechanisms of crack growth in quartz. *Jour. Geophys. Res.*, Vol. 80, pp. 4837~4844.
- 33) Dunning, J. D. (1978): A microscopic, submicroscopic and microseismic analysis of stable crack propagation and the effect of chemical environment on stable crack propagation in synthetic quartz. Ph.D. Thesis, Univ. North Carolina, Chapel Hill, N. C.
- 34) Brace, W. F. and Walsh, J. B. (1962): Some direct measurements of the surface energy of quartz and orthoclase. *Amer. Mineral.*, Vol. 47, pp. 1111~1122.
- 35) Gilman, J. J. (1959): "Dislocations and mechanical properties of crystals" Fisher, J. C., Johnston, W. G., Thomson, R. and Vreeland, T. (eds), Wiley & Sons, New York, p.116.



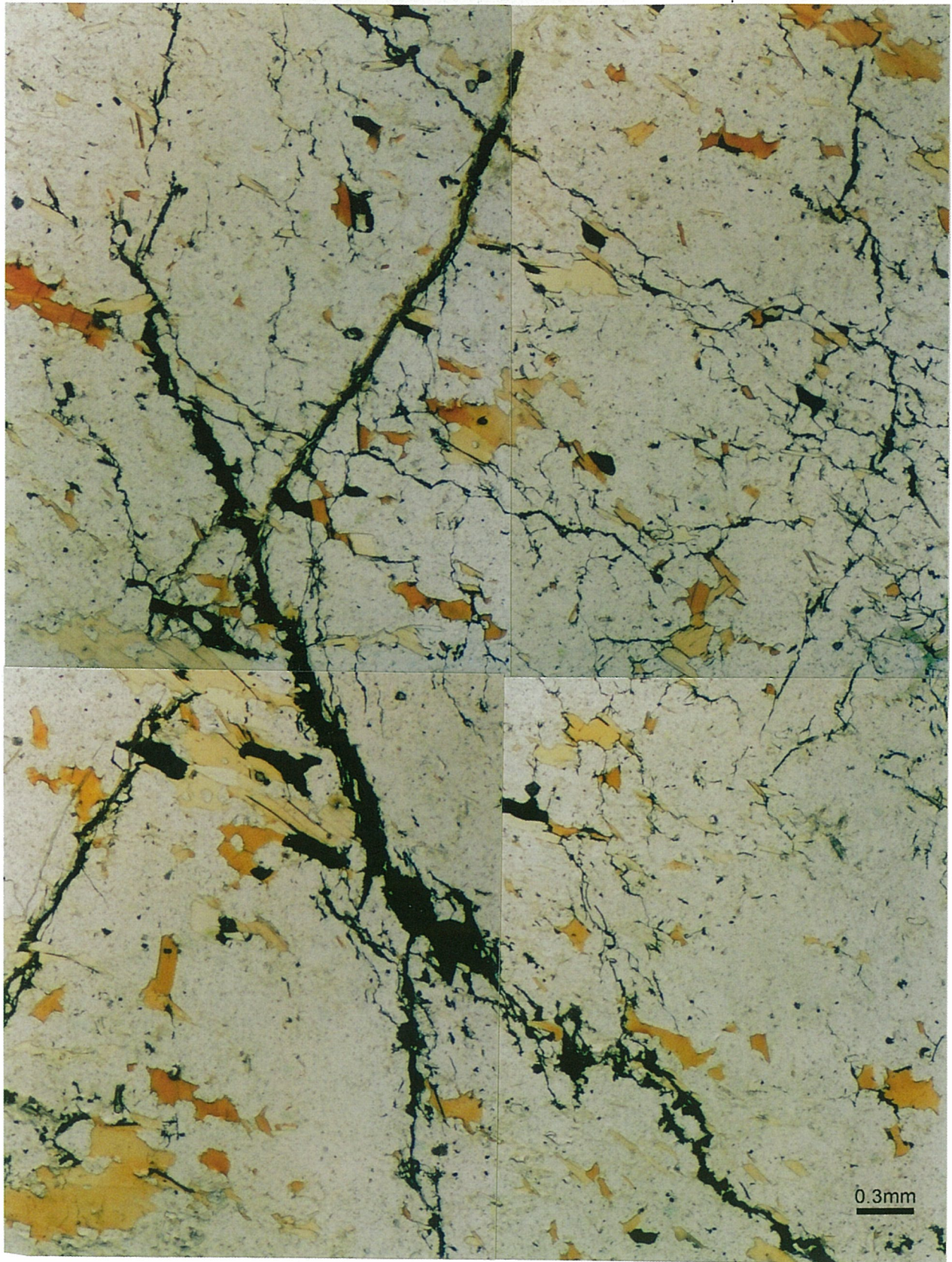
図版-1 黒色の面構造として観察される共役断層、セット-I、セット-IIのクロス・セクション（薄片-1）の顕微鏡写真

Plate 1 Microphotograph of cross-section (thin section-1) of conjugate faults, Set-I and Set-II, observed as black planar structures.



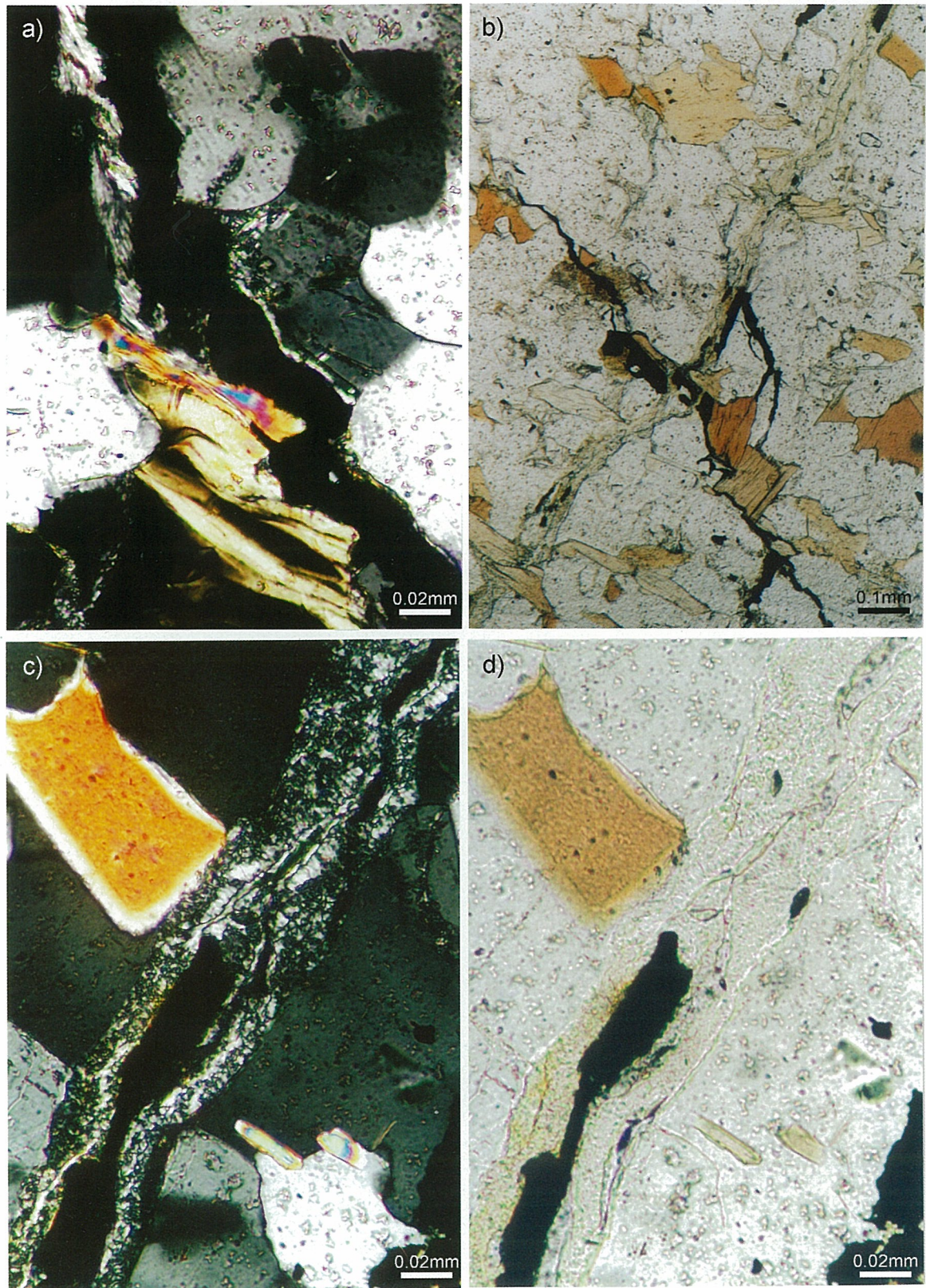
図版-2 薄片-1 (図版-1) に平行で約5 mm離れた位置で作成された薄片-2の顕微鏡写真。図版-1の共役断層、セット-I、セット-IIが図版-2にも観察される。

Plate 2 Microphotograph of the thin section-II which is parallel to and away by ca. 5 mm from the thin-section I. The conjugate faults, Set-I and Set-II, of Plate 1 are also observed in this plate.



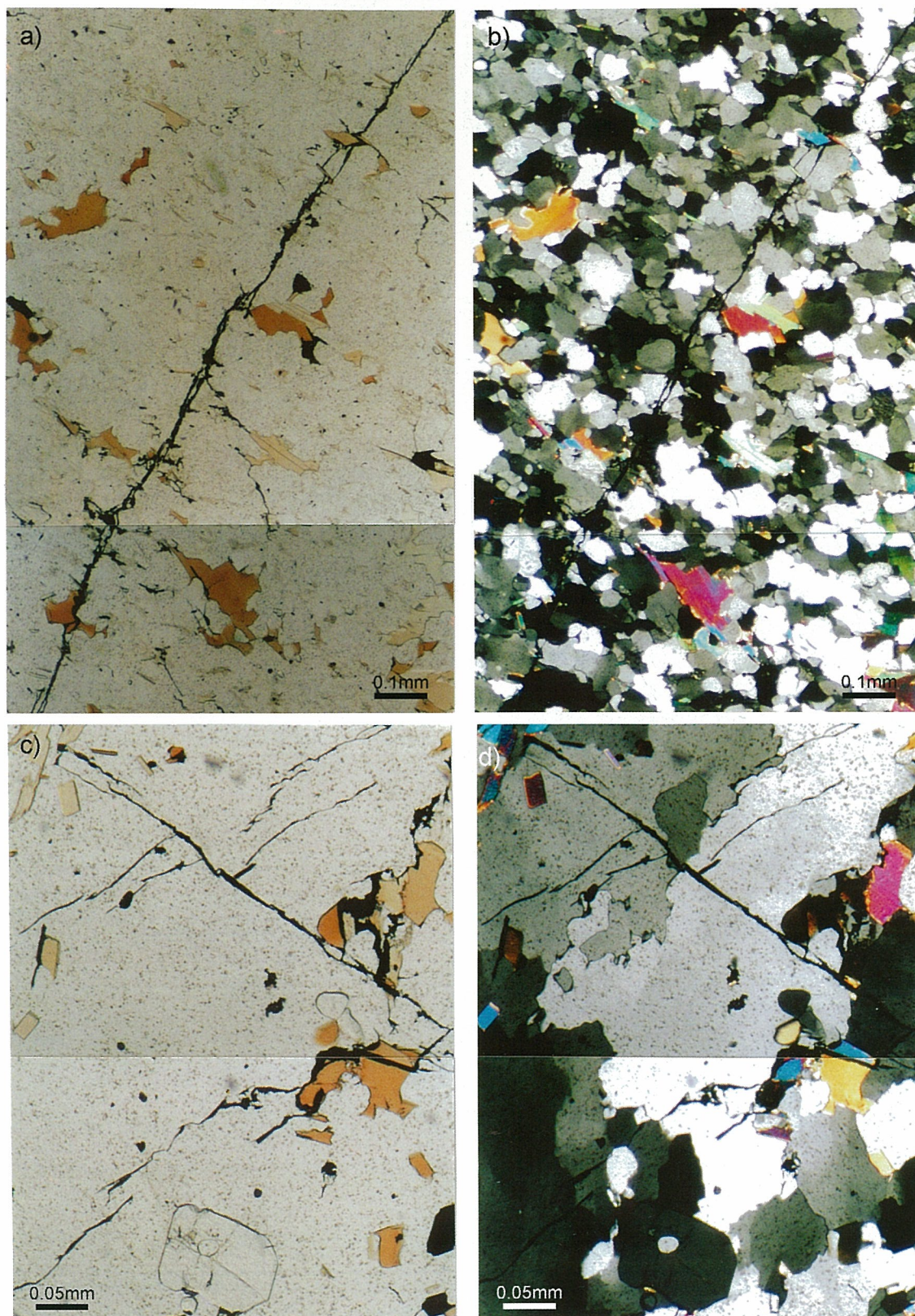
図版-3 グラファイト充填クラックとしてのSI-2断層とSII-1断層の交差点とその周辺の顕微鏡写真

Plate 3 Microphotograph of the intersection zone of the SI-2 and the SII-1 fault as graphite-filled cracks and its surroundings.



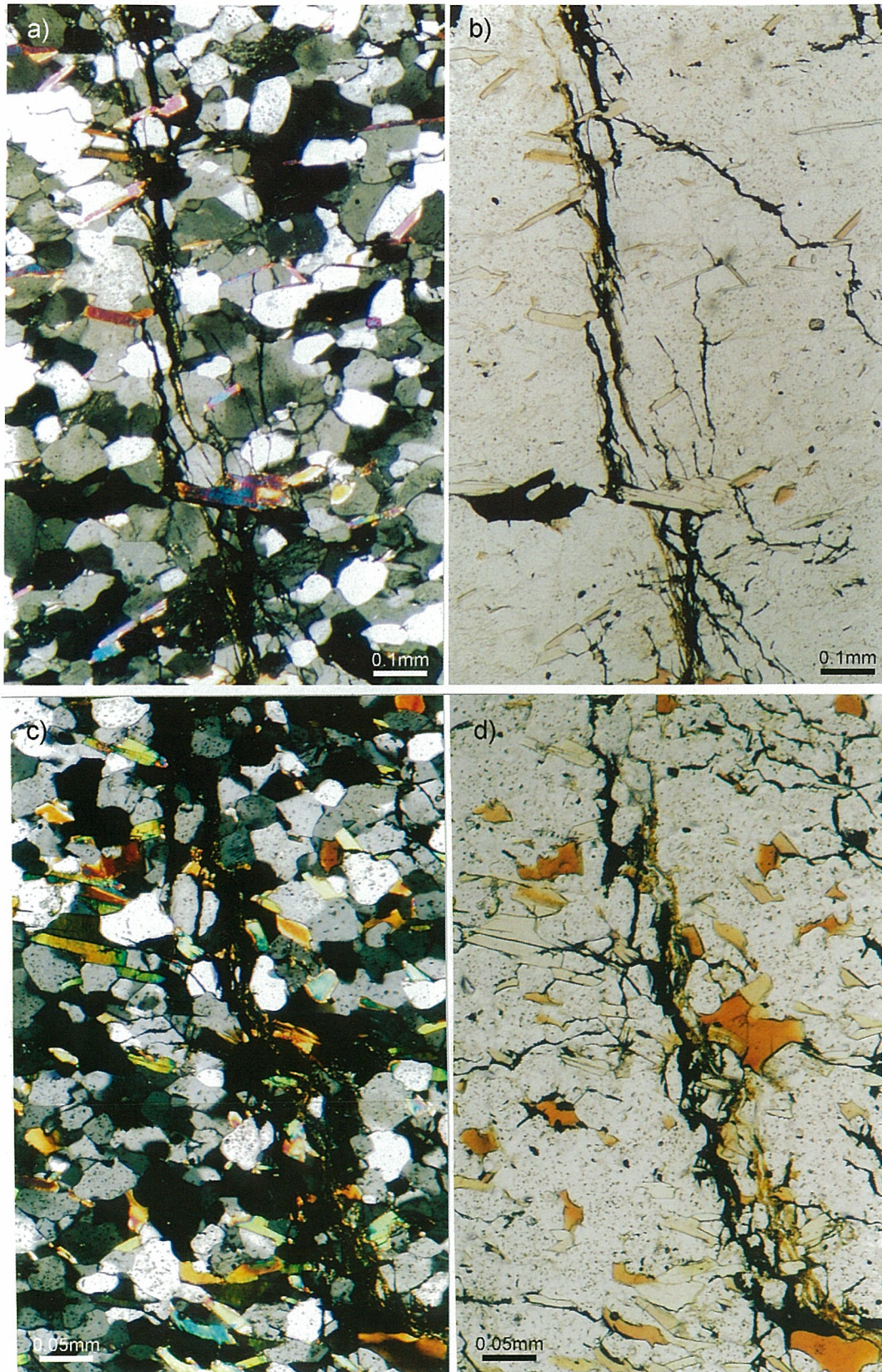
図版-4 a) グラファイト充填クラックと白色葉片状鉱物充填クラックからなるSII-2b下部の顕微鏡写真、
 b) 白色葉片状鉱物充填クラックからなるSI-2とグラファイト充填クラックからなる従属断層Ssの
 交差部の顕微鏡写真、c) とd) SI-2を構成するグラファイト粒と白色葉片状鉱物粒の間の関係を示
 す顕微鏡写真 (c: クロス・ニコル、d: オープン・ニコル)

Plate 4 a) microphotograph of the lower part of the SII-2b which consists of graphite-filled crack and
 white flaky mineral-filled crack, b) microphotograph of the intersection zone of the white flaky
 mineral-filled SI-2 and graphite-filled subordinate fault Ss, c) and d) microphotographs showing
 relationship between graphite grains and white flaky mineral in the SI-2 (c: under crossed nicols,
 d: under lower nicol only).



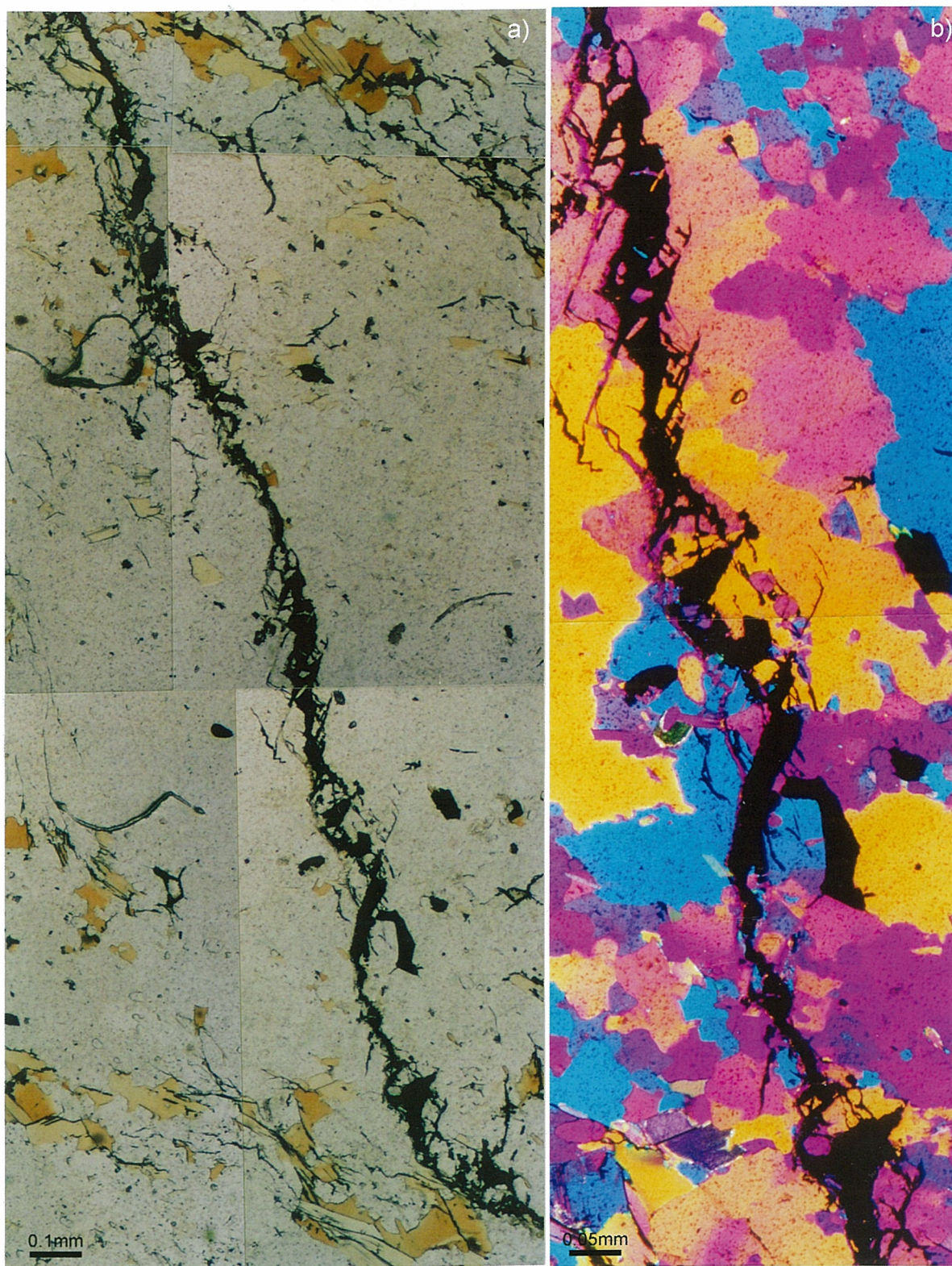
図版-5 a) と b) A型の1~2枚のグラファイト充填クラックからなるSI'-3の第二次面構造の顕微鏡写真 (a : オープン・ニコル、b : クロス・ニコル)、c) と d) A型の1枚のグラファイト充填クラックからなるSI'-4の第二次面構造とそれと交差するグラファイト充填クラックからなる従属断層Ssの顕微鏡写真 (c : オープン・ニコル、d : クロス・ニコル)

Plate 5 a) and b) microphotographs of the second order planar structure of the SI'-3 consisting of single or two graphite-filled cracks of A type (a: under lower nicol only, b: under crossed nicols), c) and d) microphotographs of the second order planar structure of the SI'-4 consisting of single graphite-filled crack of A type and its intersecting subordinate fault Ss filled with graphite (c: under lower nicol only, d: under crossed nicols).



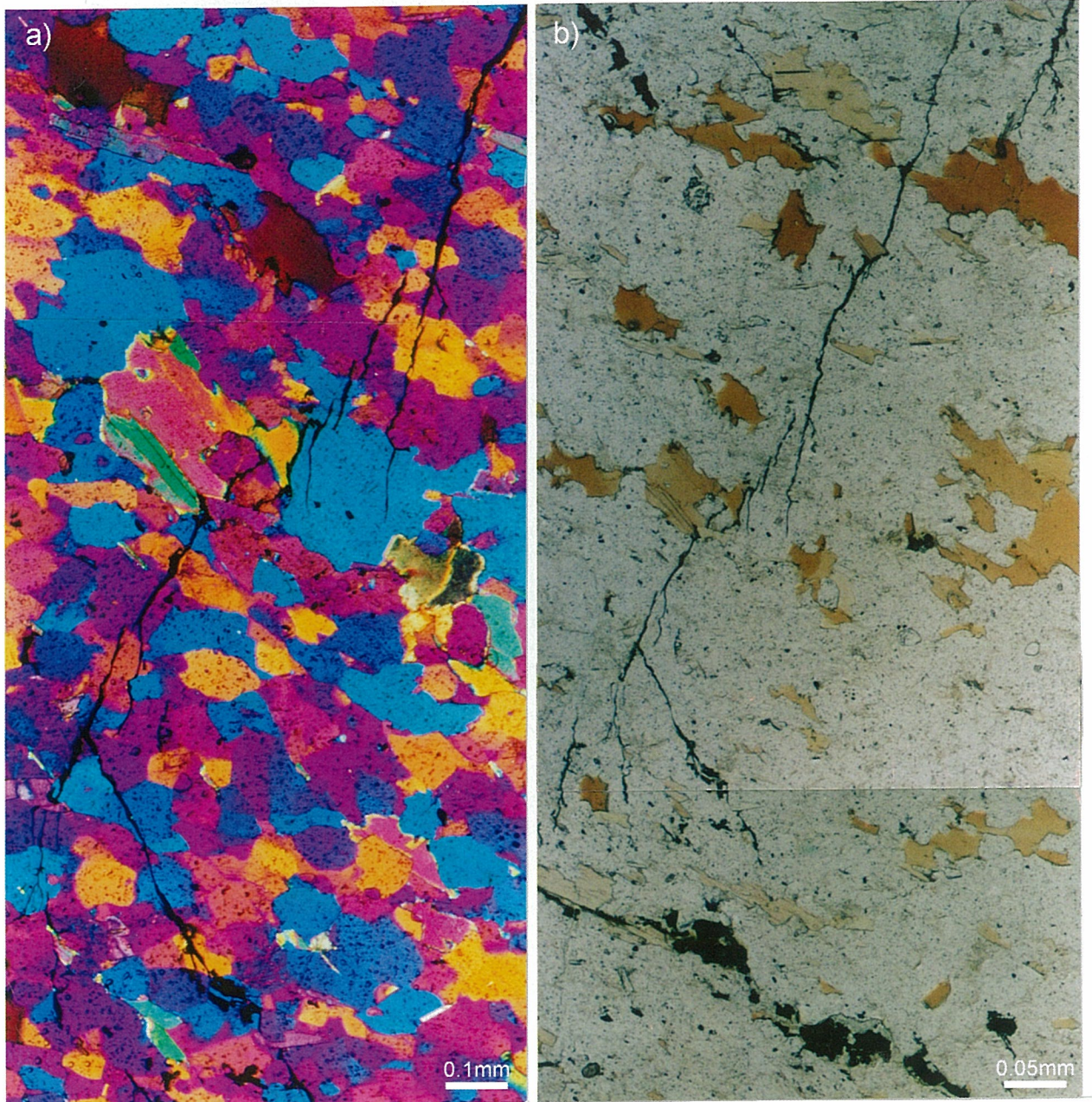
図版-6 a) と b) グラファイト充填クラックからなるSI'-2の第三次面構造の顕微鏡写真 (a : クロス・ニコール、b : オープン・ニコール)、c) と d) グラファイト充填クラックからなるSII-3の第三次面構造の顕微鏡写真 (c : クロス・ニコール、d : オープン・ニコール)

Plate 6 a) and b) microphotographs of the third order planar structures of the SI'-2 which consist of graphite-filled cracks (a: under crossed nicols, b: under lower nicol only), c) and d) microphotographs of the third order planar structures of the SII-3 which consist of graphite-filled cracks (c: under crossed nicols, d: under lower nicol only)



図版-7 a) と b) グラファイト充填クラックからなるSII-2b中央部の第三次面構造の顕微鏡写真 (a : オープン・ニコール、b : ジプサム・プレート下)

Plate 7 a) and b) microphotographs of the third order planar structures of the central part of the SII-2b, which consist of graphite-filled cracks (a: under open nicol only, b: under gypsum plate).



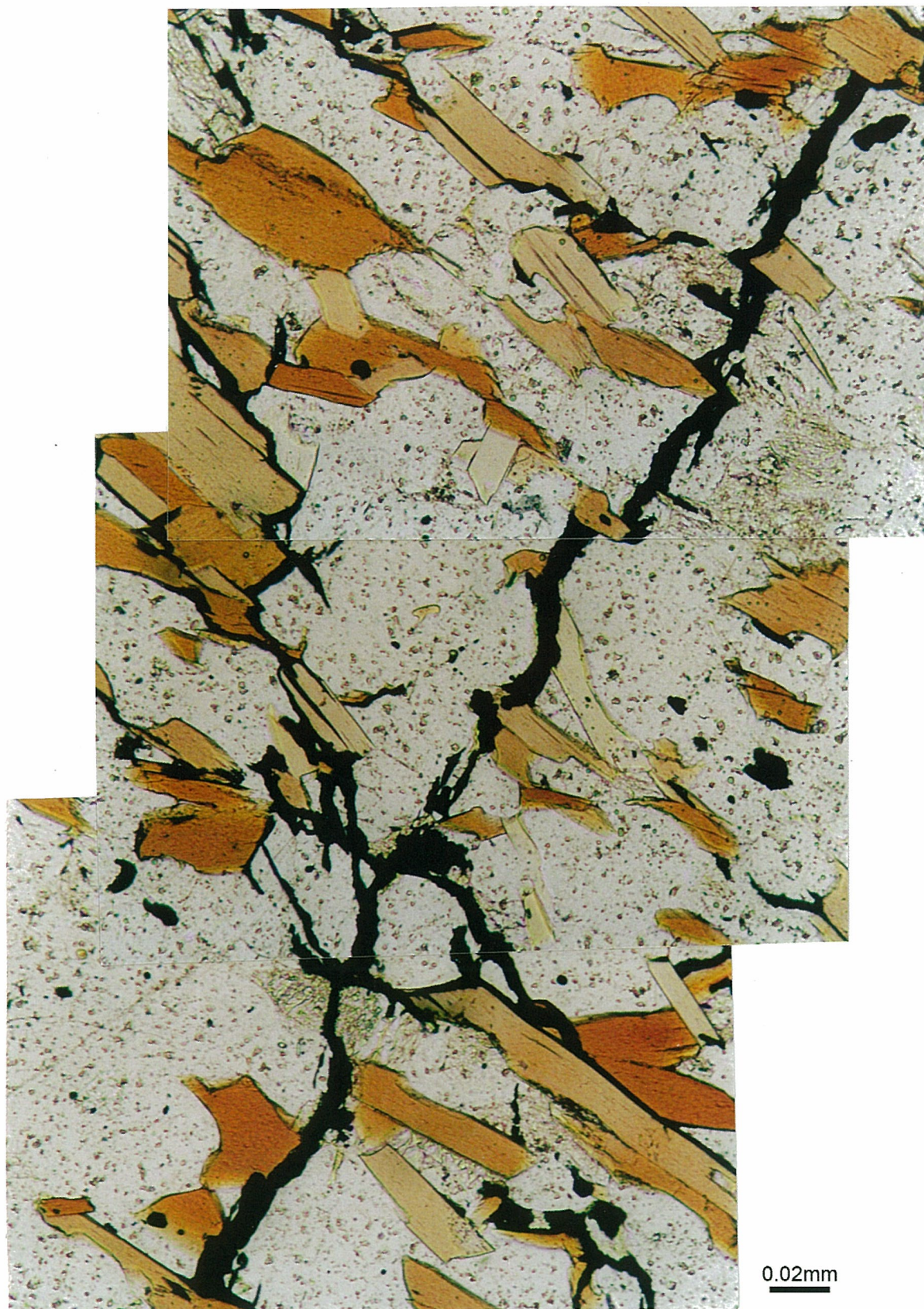
図版-8 a) と b) A型のグラファイト充填クラックからなるSI-1の雁行配列第二次面構造の顕微鏡写真。第一次面構造SI-1の末端でグラファイト充填クラックはホーステイル型スプレイを示す (a: ジブサム・プレート下、b: オープン・ニコル)

Plate 8 a) and b) microphotographs of the second order planar structures of the SI-1 which consist of graphite-filled cracks of A type with an echelon arrangement. The end of the SI-1 as the first order planar structure shows a horsetail type splaying of graphite-filled cracks (a: under gypsum plate, b: under open nicol only).



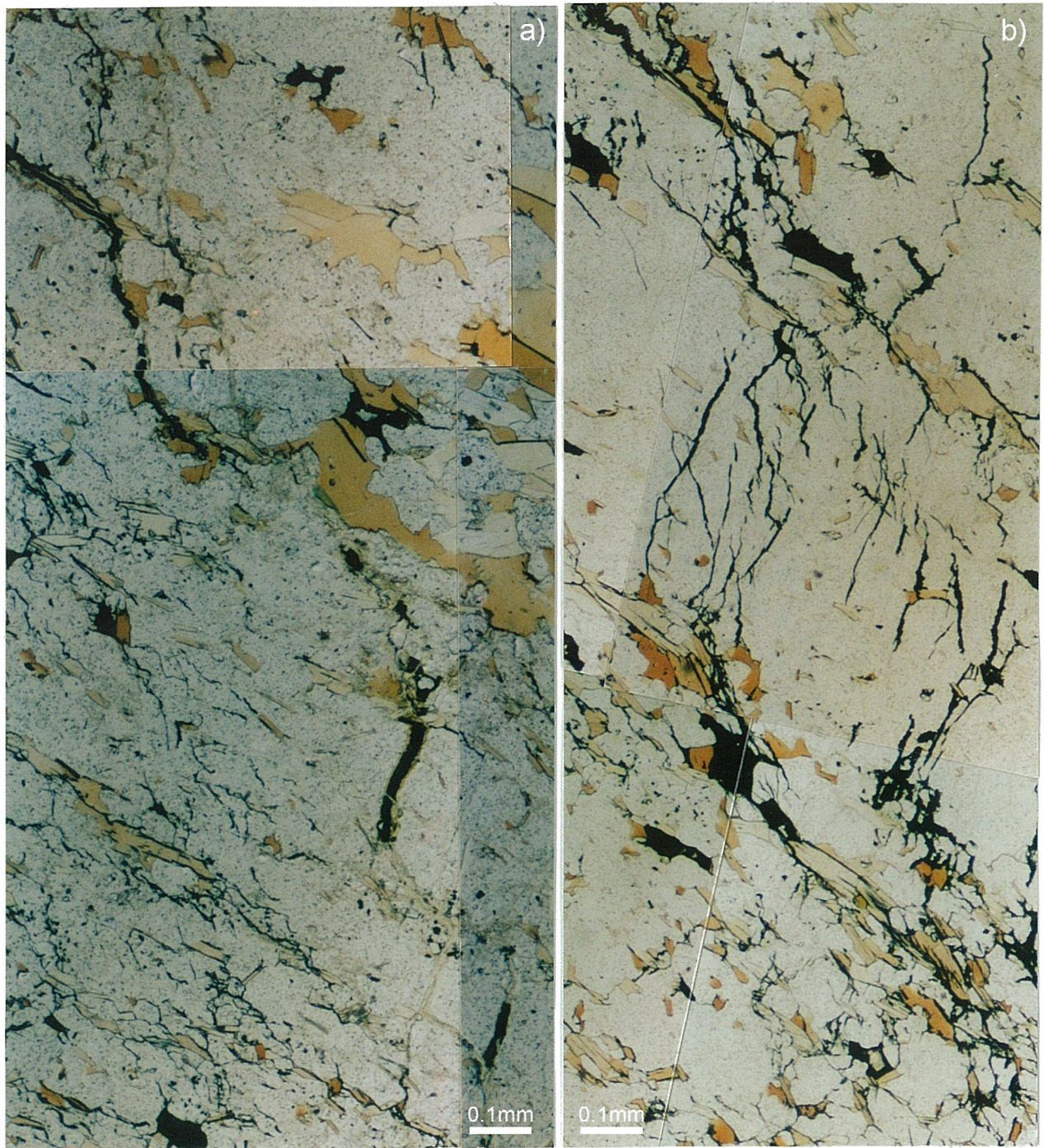
図版-9 グラファイト充填クラックからなるSII-4の雁行配列第二次面構造の顕微鏡写真。末端は片麻構造に沿ったbifurcating型ブスレイを示す (オープン・ニコル)

Plate 9 Microphotograph of the second order planar structures of the SII-4 which consist of graphite-filled cracks with an echelon arrangement. The end of the SII-4 as the first order planar structure shows a bifurcating type splaying of graphite-filled cracks along the gneissosity (under open nicol only).



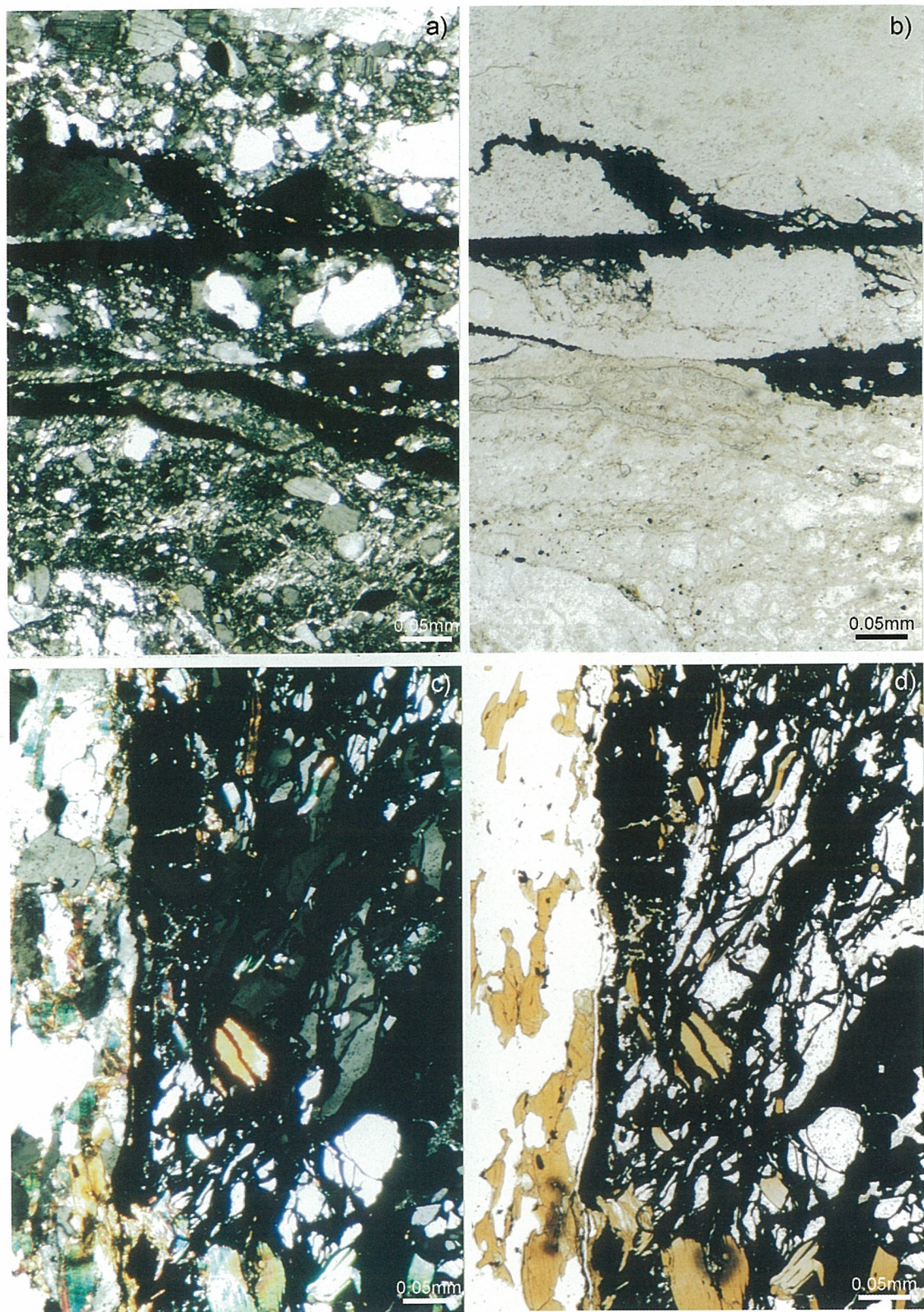
図版-10 グラファイト充填クラックからなるSI-4の第二次面構造とそれと交差するグラファイト充填クラックの顕微鏡写真。石英・長石集合体を直線的に走るグラファイト充填クラックは黒雲母に接した位置で粒界に沿って走り、そのトレンドがシフトする。しかし、SI-4の平均トレンドはほぼ直線的である。(オープン・ニコル)

Plate 10 Microphotograph of the second order planar structure of the SI-4 and its intersecting graphite-filled cracks. The graphite-filled crack of SI-4 straightly runs throughout quartz-feldspar aggregates, in contact with biotite flakes being shifted along their grain boundaries, though their average trend does not change forming approximately straight SI-4 (under open nicol).



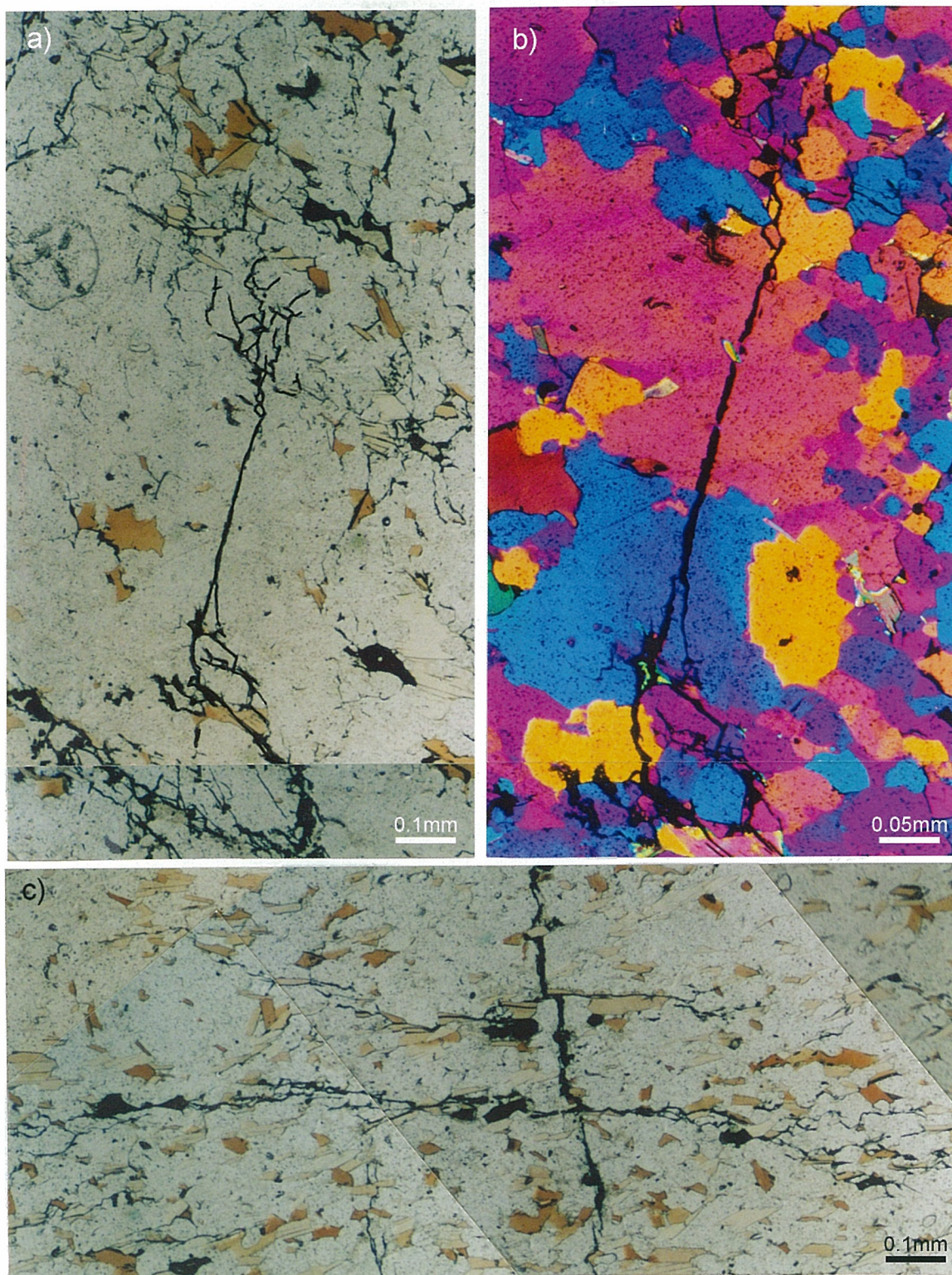
図版-11 a) SII-2bとSII-3aの結合部の第二次面構造の顕微鏡写真。グラファイト充填クラックからなる部分は主として片麻構造に高角度、葉片状鉱物からなる部分は主として片麻構造に沿って発達している、b) SII-2bの末端におけるグラファイト充填クラックの構造：粗粒石英-長石層でホーステイル型、黒雲母に富む層でbifurcating型。(オープン・ニコル)

Plate 11 a) microphotograph of the second order planar structures around the linkage of the SII-2a and the SII-3. The second order planar structures consisting of graphite-filled cracks are mainly oriented at high angles to the gneissosity, while those consisting of white flaky mineral-filled cracks are mainly along the gneissosity, b) microphotograph of the second order planar structure at the end of the SII-2b which consists of graphite-filled cracks, and shows a horsetail type splaying in coarse-grained quartz-feldspar layer and bifurcating type splaying in the biotite-rich layer (under open nicol).



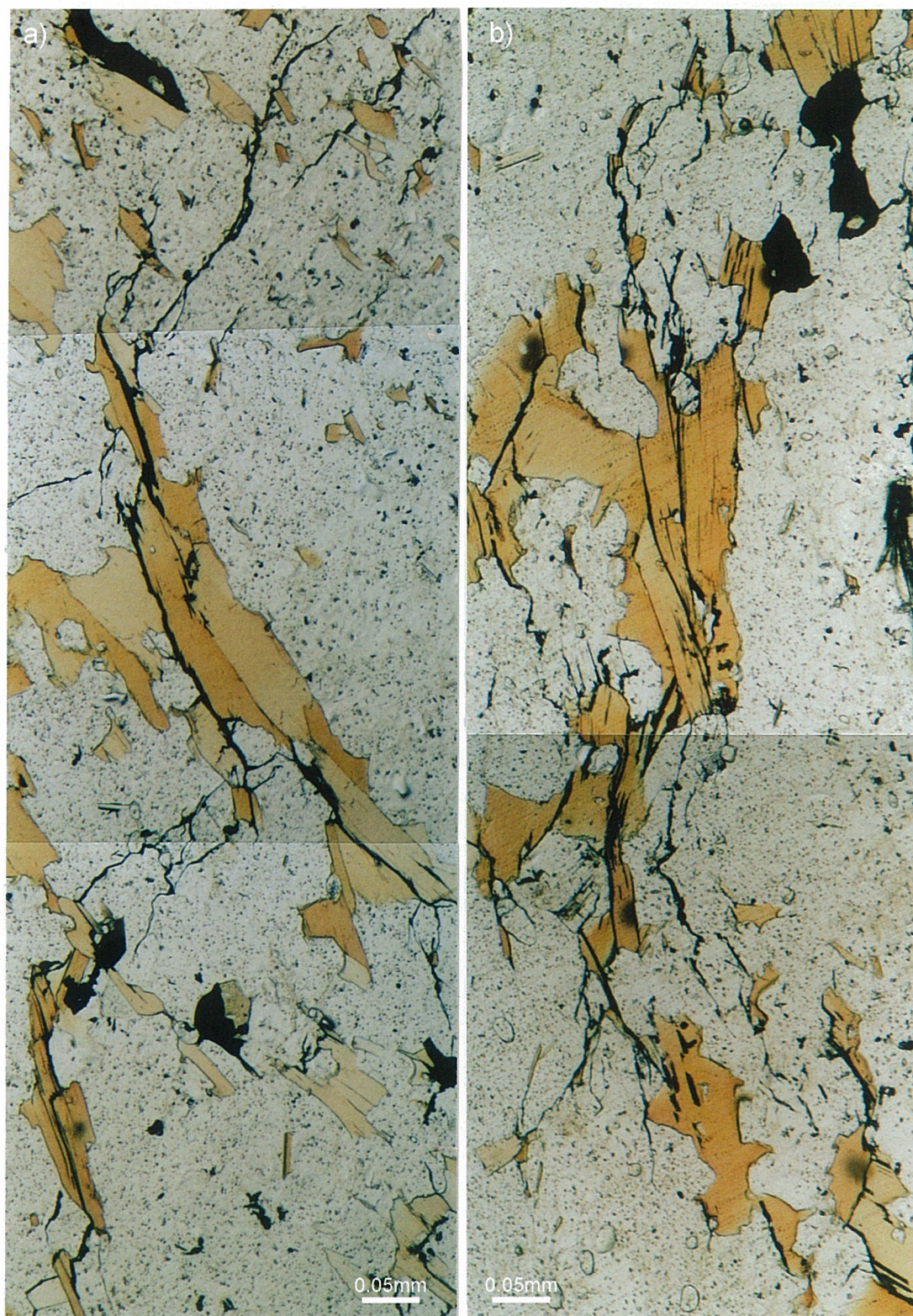
図版-12 a) と b) つくば1350 mボーリングの768.7 m深度から採集された花崗岩カタクレサイトの顕微鏡写真。グラファイト充填クラック (写真上部) と白色葉片状鉱物充填クラック (写真下部) を示す、c) と d) つくば1350 mボーリングの693.4 m深度から採集された泥質片麻岩中のクラッシュされた石英のグラファイト充填クラック (a と c: クロス・ニコル、b と d: オープン・ニコル)

Plate 12 a) and b) microphotographs of granite cataclasite from 768.7 m depth of the Tsukuba 1350 m Boring, showing graphite-filled cracks (upper part) and white flaky mineral-filled cracks (lower part), c) and d) microphotographs of graphite-filled cracks of crushed quartz in pelitic gneiss from 693.3 m depth (a and c: under crossed nicols, b and d: under lower nicol only)



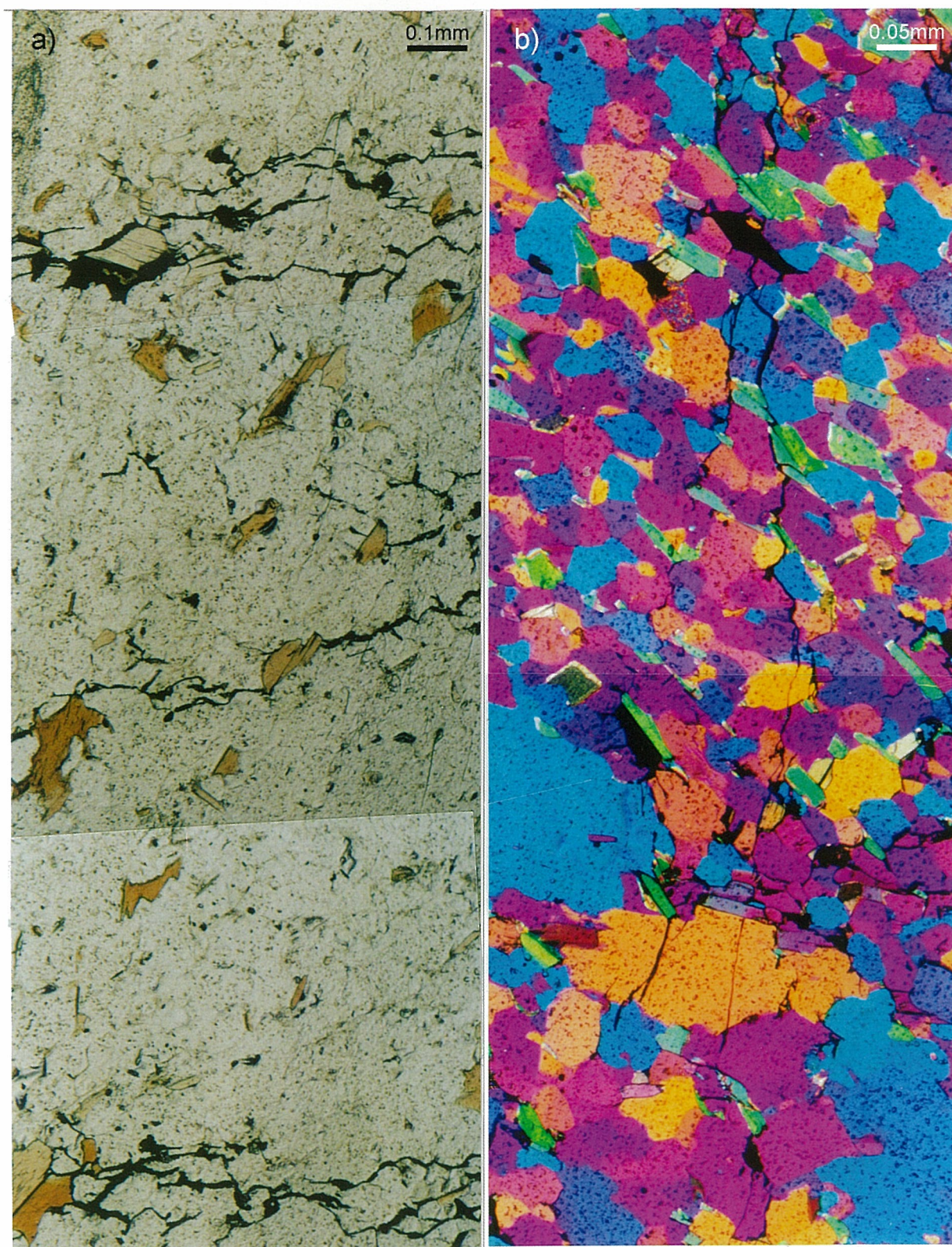
図版-13 a) と b) 粗粒石英を切断する従属断層Ssの顕微鏡写真。断層中央部のA型の1枚のシャープなグラファイト充填クラックと末端のホーステイル型スプレイが明瞭 (a: オープン・ニコル、b: ジプサム・プレート下)、c) SI-4を切断し片麻構造に沿って発達する従属断層Ssの顕微鏡写真。断層中央部の平滑なグラファイト充填クラック——一部に雁行性クラックを伴う——と、末端の片麻構造に沿ったbifurcating型スプレイ (c: オープン・ニコル)

Plate 13 a) and b) microphotographs of subordinate fault cutting across coarse-grained quartz, clearly showing a single sharp straight graphite-filled crack of A Type in its central part and horsetail type splaying in its ends, (a: under lower nicol only, b: under gypsum plate), c) microphotograph of two subordinate faults along the gneissosity which cut across the SI-4, showing fairly planar graphite-filled crack, partly with an echelon arrangement cracks, and bifurcating type splaying in their ends (c: under lower nicol only).



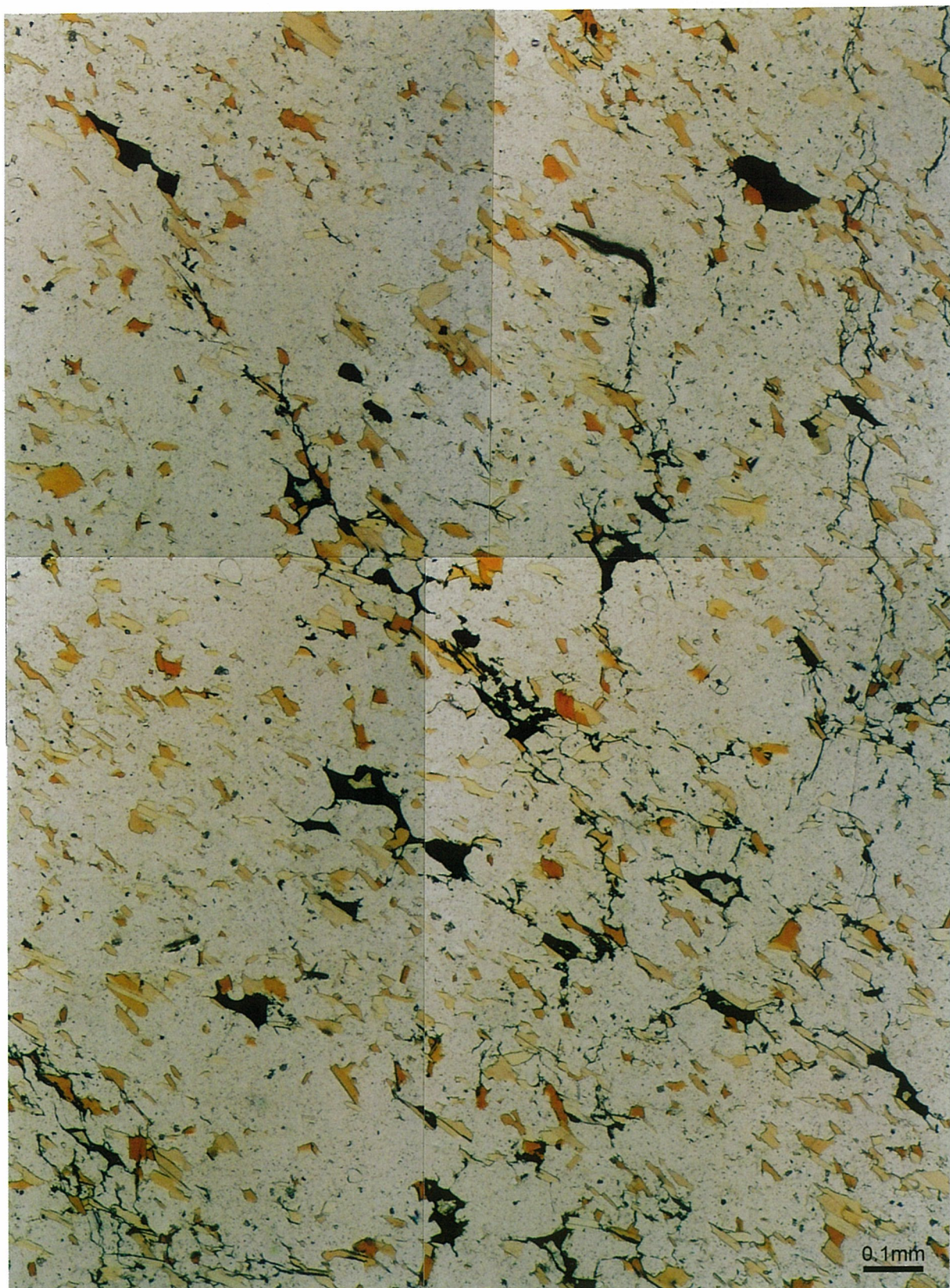
図版-14 a) 雁行配列し bend type ステップを形成する従属断層 Ss の顕微鏡写真。Ss を形成するグラファイト充填クラックは、石英・長石集合体で片麻構造に高角度、黒雲母において片麻構造に平行となってステップを形成、b) 黒雲母に富む層に沿ってうねうねしたグラファイト充填クラックが集合する変形帯 (a と b : オープン・ニコル)

Plate 14 a) microphotograph of subordinate faults Ss which show an echelon arrangement with bend type steps. Ss in quartz-feldspar aggregates is oriented in an echelon fashion and at high angles to the gneissosity, and Ss in biotite flakes is parallel to the gneissosity, forming bend type step. b) microphotograph of deformation band in biotite-rich layer which is characterized by aggregate of many wavy graphite-filled cracks along the gneissosity (a and b: under lower nicol).



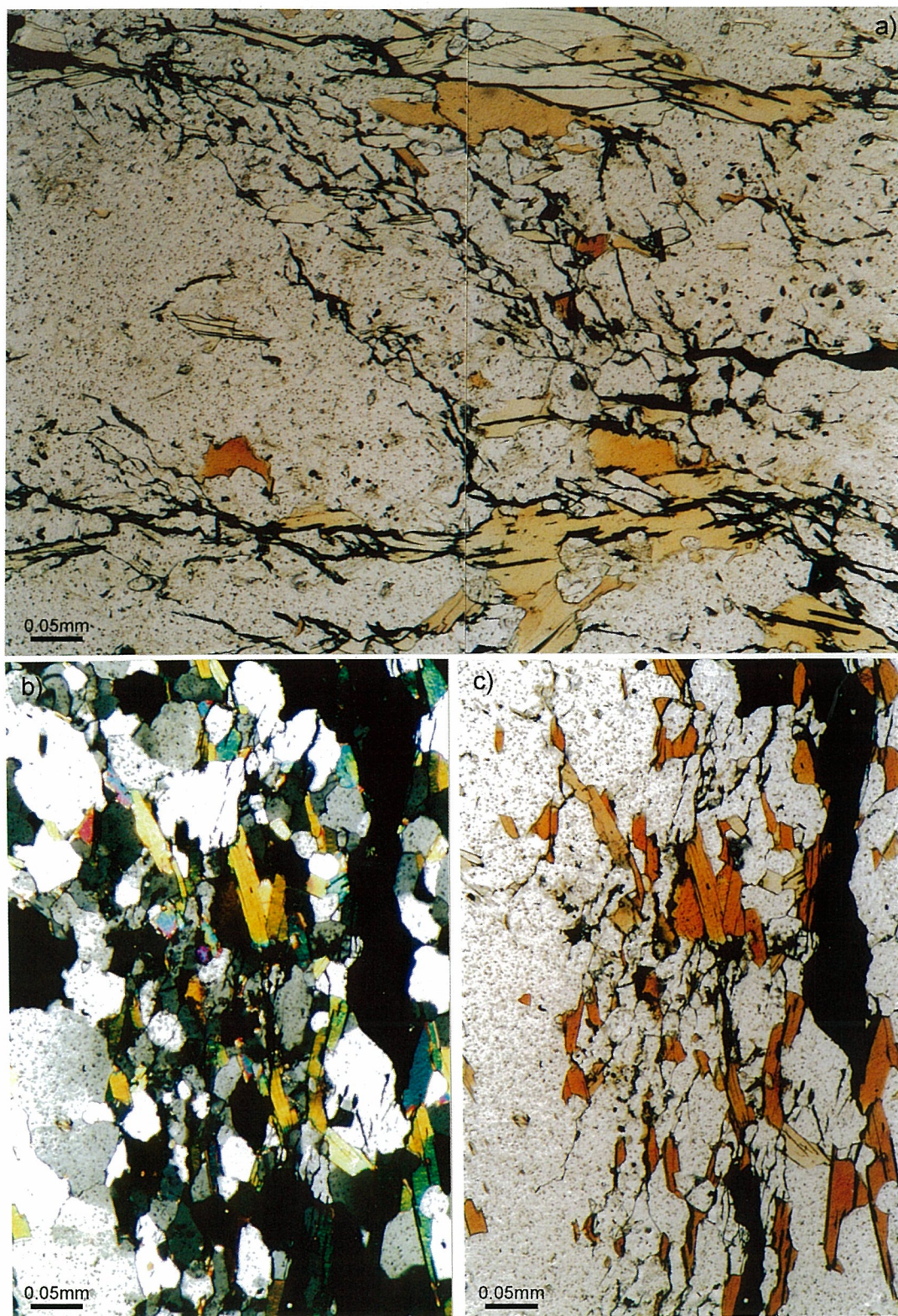
図版-15 a) と b) グラファイト粒の集合する変形帯の顕微鏡写真 (a: オープン・ニコル、b: ジプサム・プレート下)。b) の顕微鏡写真は図版-16の右端の変形帯に対応する。

Plate 15 a) and b) microphotographs of deformation bands defined by aggregate of graphite grains in high density (a: under lower nicol only, b: under gypsum plate). Deformation band in the microphotograph of (b) corresponds to that found in the right end of Plate 16.



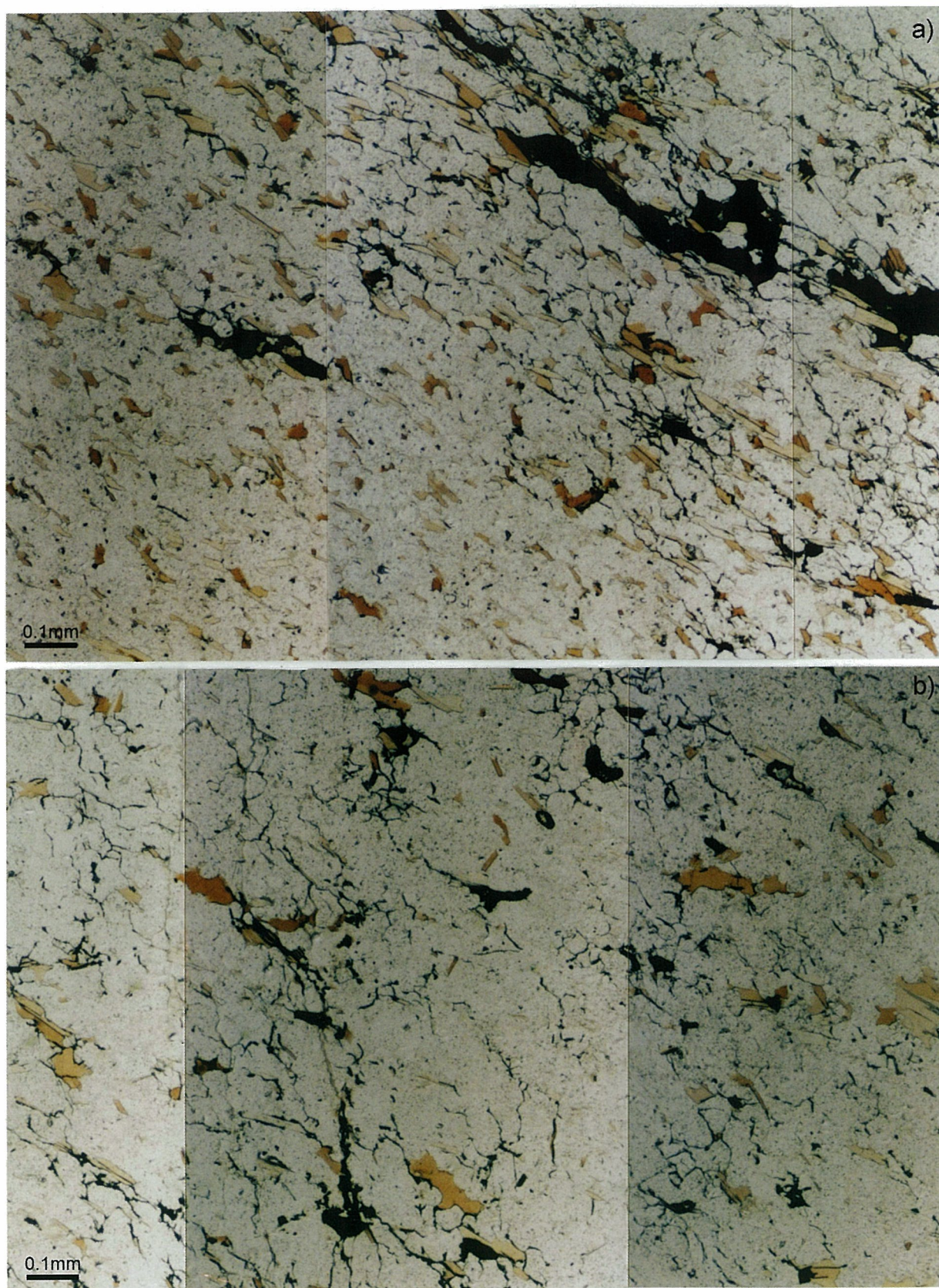
図版-16 グラファイト粒の集合する5つの変形帯の顕微鏡写真（オープン・ニコル）。この5つの変形帯の位置は図-2 a に示されている。

Plate 16 Microphotographs of five deformation bands defined by aggregate of graphite grains in high density whose localities are shown in Fig. 2a. (under lower nicol only)



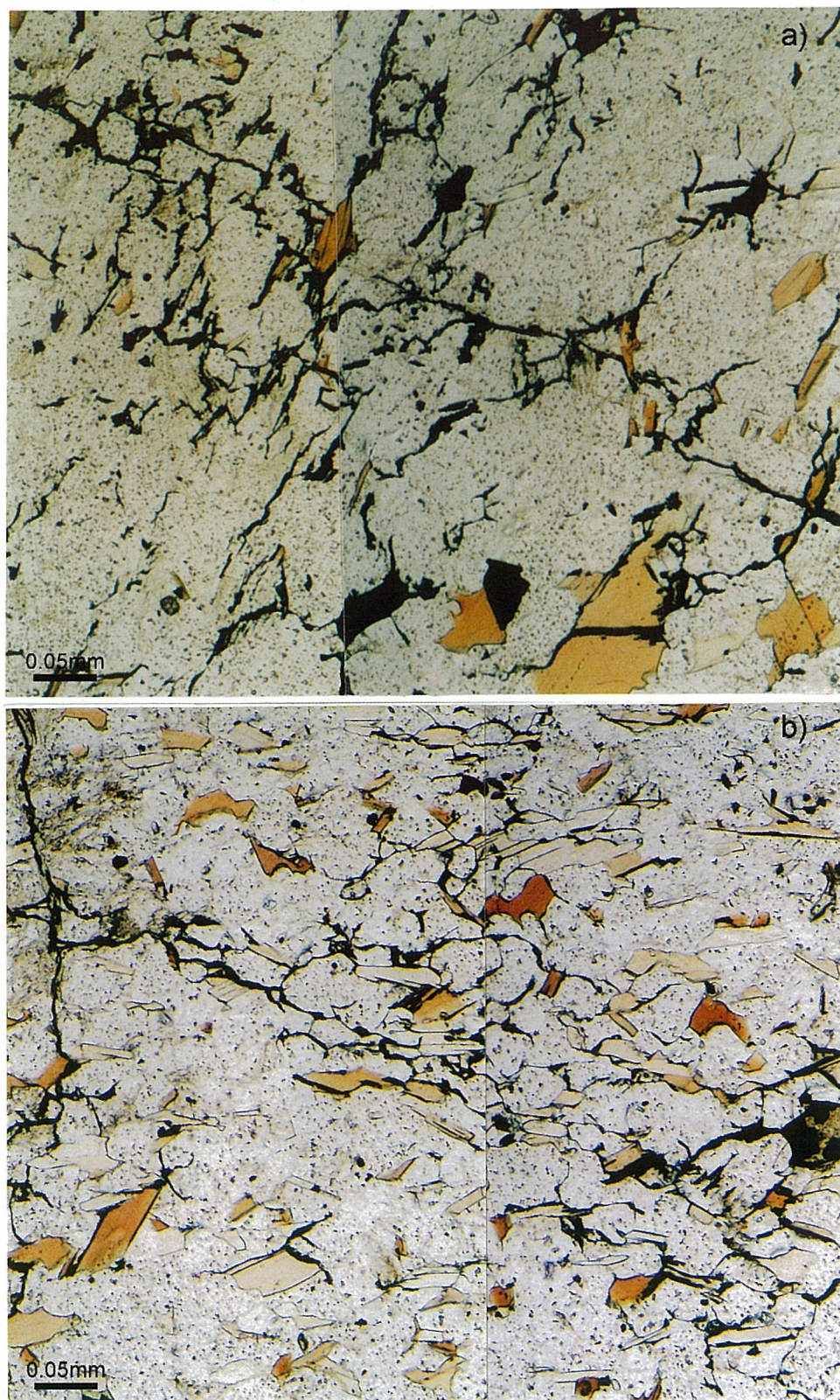
図版-17 a) 黒雲母に富む層に取り巻かれた石英-長石層において片麻構造に斜交して発達する変形帯の顕微鏡写真 (オープン・ニコル)。黒雲母に富む層では、グラファイト粒は片麻構造に沿った形態配列を示す。b) と c) 細粒黒雲母・石英・長石層に見られる変形帯の顕微鏡写真 (b: クロス・ニコル、c: オープン・ニコル)。石英・長石粒を破碎するグラファイト充填クラックが片麻構造に低角度で定向配列。

Plate 17 Microphotograph of deformation band oblique to the gneissosity which is developed in a quartz-feldspar layer surrounded by biotite-rich layers (under lower nicol only). Graphite grains in biotite-rich layers are preferably oriented along the gneissosity. b) and c) microphotographs of deformation band in a fine-grained biotite-quartz-feldspar layer (b: crossed nicols, c: lower nicol only). Graphite-filled cracks crushing quartz and feldspar grains are preferably oriented at low angles to the gneissosity.



図版-18 a) と b) 図-6 の高密度帯 A (a) と C (b) のグラファイト粒の示す微細構造の顕微鏡写真 (オープン・ニコル)。図版-18 a) では、高密度帯 A は図版の右上側に分布する。説明の詳細は本文。

Plate 18 Microphotographs of microstructures shown by graphite grains in high-density zones A (a) and C (b) in Fig.6 (under lower nicol only). The high density domain A is formed only in right upper side of Plate 18a. For further explanations see the text.



図版-19 a) と b) 図-6 の高密度帯B (a) とF (b) のグラファイト粒の示す微細構造の顕微鏡写真 (オープン・ニコル)。図版-19 a) の中央に見られる左雁行グラファイト充填クラックは、SI-3b に対応する。図版-19 b) の左端に見られる高角度グラファイト充填クラックはSI-4に対応する。説明の詳細は本文。

Plate 19 a) and b) microphotographs of microstructures shown by graphite grains in high-density domains B (a) and F (b) in Fig.6 (under lower nicol only). Sinistral en echelon graphite-filled cracks found in the central part of Plate 19a correspond to the SI-3b, and graphite-filled crack oriented at high angles in the left end of Plate 17b corresponds to the SI-4.