

## 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 —

妹尾洋一・三本健四郎・山根 誠・吉田 浩・岡野 肇・原 郁夫

### Geology of the 1350m Boring Cores from the OYO CORPORATION TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER (3) — Cracks in Quartz —

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

#### Abstract

In psammitic gneiss core from 646.76m depth of the 1350m Boring drilled in the OYO CORPORATION TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER, Tsukuba, Japan are found extensional cracks in an echelon fashion preferably oriented in moderate angles to the gneissosity. The cracks in quartz are recognized as white flaky mineral-filled veins (white mineral veins). The veins are deformed forming conjugate kink bands in micro-scales, though they occur within quartz. It has been concluded that the deformation of the host quartz responsible for the formation of conjugate kink bands of the white mineral veins occurred in Mode II fracturing forming conjugate shear cracks.

In pegmatite core from 945m depth of the 1350m Boring are found cracks in conjugate sets. The cracks in quartz are recognized as white flaky mineral-filled veins with minute dark mineral dusts, and the acute angle of the conjugate crack sets in quartz is ca.  $45^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$  on average. Nucleation-growth of cracks in quartz occurred accompanying its plastic lattice deformation and dynamic recrystallization just around them under the condition for the formation of subbasal I type deformation lamellae. The plastic lattice deformation and dynamic recrystallization of quartz are induced due to slipping along the crack surfaces. The cracks in quartz are considered to be of Mode II type in origin. The formation of Mode II type cracks in quartz appears to have occurred under the condition around brittle-ductile transition of its deformation.

#### (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646.76m深度で採取された砂質片麻岩コアには、片麻構造に中角度で傾斜して雁行状に配列する引張クラックが観察される。石英中のこのクラックは白色葉片状鉱物が充填する脈(白色鉱物脈)として観察される。白色鉱物脈は共役キック帯を形成する。このキック帯に沿った変位は母晶石英にまで連続発達する。白色鉱物脈の共役キック帯の形成に関わる母晶石英の変形は、共役的なシア・クラックの形成(モード-II 破碎)であると結論された。

1350mボーリングの945m深度で採取されたペグマタイト・コアには約 $45^{\circ}$ ~ $50^{\circ}$ で交わる共役クラックが観察される。石英中のこのクラックは、白色葉片状鉱物と微細な黒色不透明鉱物が充填する脈(白色鉱物脈)として観察される。石英におけるこのクラックの発生-成長は、石英に subbasal I 変形ラメラが形成される条件下で、クラック近傍における石英の塑性的な格子面歪みと動的再結晶作用を伴うようにして起こった。クラックはモード-II に属し、クラック面に沿った滑りが、その近傍の石英の塑性的な格子面歪みと動的再結晶作用をもたらしたものと考えられる。石英におけるモード-II クラックの形成は、brittle-ductile transition 相当の変形条件下で起こる現象であるように見える。

キーワード：石英，クラック，モード-II，塑性格子面変形，動的再結晶作用

## 1. 緒言

石英は上部地殻を構成する最も主要な造岩鉱物である。このため上部地殻の変形特性の解明には、石英の変形機構の理解は極めて重要なことである。地殻変動の過程における石英の変形機構としては、結晶内格子面すべりによる変形、結晶粒界すべりによる変形、圧力溶解による変形、クラック (grain boundary cracks, intercrystalline cracks) の形成による破碎変形などが知られている。変形実験によっても石英のこのような変形特性は確認されてきたことである。しかし、石英のクラックの形成による破碎変形の機構については、いまだに必ずしも十分な理解が得られていない。石英の破碎による変形機構の解析は、地殻上部における断層現象の機構の理解につながるものとして重要である。この報告において、著者らは、応用地質株式会社がつくば技術開発センターにおいて掘削した1350mボーリングの646.76m深度と945m深度から採集されたコア試料 (図-1) において観察された石英のクラックを詳細に記載するが、それは石英のクラックの形成による破碎変形の機構の理解に対して極めて重要な意味をもつ情報を提供するものと考えられる。

地殻変動の過程に石英中に形成されたクラックには、クラック面に沿って明瞭な滑りを示すものがある。図版-1 a(b) がその一例である。写真中央の石英 (点A) が、クラックに沿った滑りによって変位しており、その面に沿って黒雲母 (点Bの右) にひきずり褶曲が認められるのであるが、このクラックが初生的に剪断割れ目として発生したものであるかどうかは明らかでない。図版-1 c(d) では、石英中に発達する平滑なクラックにより、包有斜長石が切断変位 (右横ずれ) している。このクラックの延長上の斜長石には、このクラックに沿った変位に対応するようにキンク帯が形成されている。キンク帯に沿った剪断センスは、クラックのそれと調和的である。したがって、このクラックは剪断割れ目であるように見える。しかし、はたして初生的に剪断割れ目として発生したクラックであったのであろうか、引っ張り割れ目として発生したクラックに沿って二次的な滑りが起こったことを示すクラックである可能性はないのであろうか。ここには後者の可能性を否定する情報はない。このように観察される石英中のクラックが、初生的に剪断割れ目として発生したクラックであるかどうかの証明はかなり困難な作業であるように見える。

しかし、岡野ほか (2001)<sup>1)</sup> は、応用地質株式会社がつくば技術開発センターにおいて掘削した1350mボーリングの745.1m深度の片麻岩に発達する共役断層を解析して、断層過程において、多くの研究者 (e. g. Scholz, 1968<sup>2)</sup>; Friedman et al., 1970<sup>3)</sup>; Haullbauer et al., 1973<sup>4)</sup>; Peng & Johnson, 1972<sup>5)</sup>; Tapponier & Brace, 1976<sup>6)</sup>; Wong, 1982<sup>7)</sup>; Moore & Lockner, 1995<sup>8)</sup>) の指摘とは違って、石英を含む造岩鉱物の変形機構が、Skempton (1966)<sup>9)</sup>, Tchalenko (1970)<sup>10)</sup>, Naylor et

al. (1986)<sup>11)</sup>, Moore et al. (1986)<sup>12)</sup> などの剪断実験からの情報に対比される特徴、R1クラック、Pクラック、Yクラック、Tクラックの形式を示すことを明らかにした。

この報告の目的の1つは、応用地質株式会社がつくば技術開発センターにおいて掘削した1350mボーリングの646.76m深度と945m深度から採集されたコア試料において観察される石英のクラック群を詳細に記載し後の研究資料として残すことである。他方では、これらの試料の石英には、岡野ほか (2001)<sup>1)</sup> の記載試料におけると同様に、初生的に剪断割れ目として発生したクラックが存在することを強く示唆する組織が読み取れることから (原ほか, 2002)<sup>13)</sup>, この報告のもつ1つの目的は、このような石英の変形組織を詳細に解析し、初生的に剪断割れ目と見られるクラックが発達するかどうかを明らかにすることである。そして、剪断割れ目と見られるクラックが発達するとすれば、石英がモードIIクラックによって変形する条件を明らかにすることである。

## 2. 646.76m深度コアの石英に見られるクラック

646.76m深度コアを構成する岩石は砂質片麻岩である。石英・カリ長石・斜長石・黒雲母を主要造岩鉱物とし、

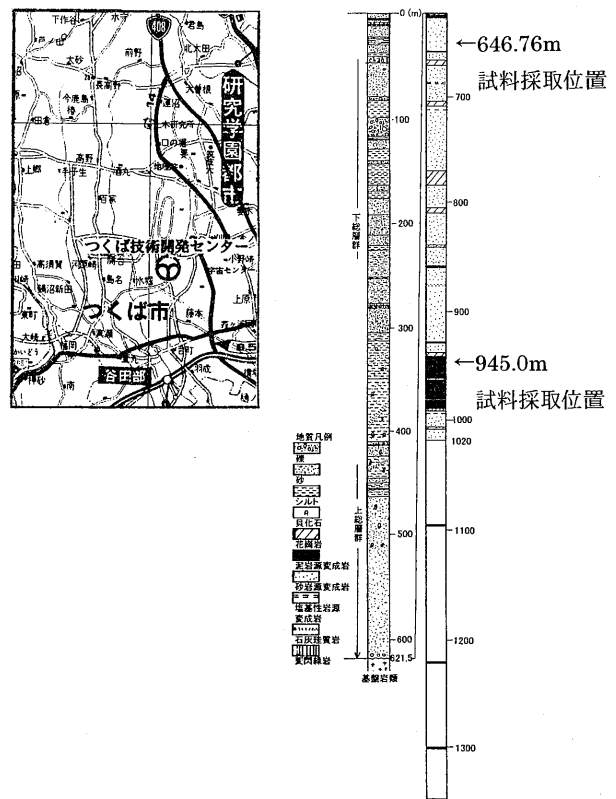


図-1 つくば1350mボアホールの位置とボーリングの地質柱状図。この報告で記載される試料の採集位置

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

珪線石を伴うやや粗粒な片麻岩である。1つの顕著な片麻構造を示し、片麻構造にそってフィブrolait・フォリア (Vernon, 1987)<sup>14)</sup>が発達する(図版-2aとb)。温度が低下した条件でのフィブrolait・フォリアに沿った剪断変形を反映して、フィブrolaitの著しい白色葉片状鉱物への変化と、この剪断面に対して中角度をなし白色葉片状鉱物が充填する平行クラック群の形成が認められる(図版-2aと2b)。これは、三本ほか(2000)<sup>15)</sup>の剪断帯-5時相の変形構造に相当する。この剪断面に対する平行クラック群の配置の特徴からすれば、この白色葉片状鉱物が充填する平行クラック群—以下簡略化して、白色鉱物脈と呼ぶことにする—は、引っ張り割れ目として発生した構造であるように見える(原, 1998<sup>16)</sup>参照)—このことは、後頁で説明しよう。しかし、この白色鉱物脈は重複変形による特異な組織を示す。この白色鉱物脈の示す特異な組織は、極めて明晰な構造特性をもつものであるが、石英中に形成された脈の組織としては、此れ迄報告された例を知らない。この白色鉱物脈の示す組織は、その構造特性から、石英の破碎による変形の機構の理解に対して重要な情報を提供するものと考えられるので、まず記載、検討することにしよう。

## 2.1 石英中の白色鉱物脈の共役キック帯

石英中の白色鉱物脈は、引っ張り割れ目として発生した平行クラック群を白色葉片状鉱物が充填して形成されたものであるが、顕微鏡下では低倍率で見た時、ギザギザした壁をもち(図版-2)、ジブサム・プレートを挿入して見た時、脈内にバーコード状に干渉色の变化が現われる脈である(図版-2d)。このような石英中の白色鉱物脈を、より高倍率の顕微鏡で撮影したものが、図版-3~図版-6の写真である。

図版-3aの白色鉱物脈は、長い翼(back limb)と短い翼(fores limb)で構成される単斜対称褶曲を形成する。写真の上部と下部で見られる単斜対称褶曲は、長い翼と短い翼の配置関係からすれば、左横ずれ剪断センスの構造である(原, 1998, p.15-17参照)<sup>16)</sup>。これに対して、写真中央の褶曲は、長い翼と短い翼の配置関係が逆になっていて、右横ずれ剪断センスの構造である。したがって、褶曲は共役褶曲(conjugate folds)である。重要なことは、この共役褶曲の短い翼が、いずれも、翼の両端をシャープな面(写真では黒色の横断線)で縁取られた帯としての特徴をもつことである。翼がこのような特徴をもつことは、その共役性から、この褶曲は共役キック帯(conjugate kink bands)であると考えられる(原, 1998参照)。翼の両端を画する帯境界面は、脈のトレンドに対して、中~低角度をなしている。

図版-3bとdの白色鉱物脈の褶曲も、図版-3aのそれとほぼ同じような特徴を示す。図版-3cの白色鉱物脈の構造は、典型的な共役キック帯である。ここでは、キック帯(短い翼)の幅は狭く、帯はシャープであり、共役性は極めて明瞭である。メディアン・セグメント

(原, 1998参照)の幅が狭く、また隣り合う同じセンスのキック帯のスペーシングが脈の厚さよりも小さいところが認められる。メディアン・セグメントの幅が極度に狭くなっている点3と点4では、キック帯は、脈の内部で交差している。キック帯は脈のトレンドに対して中角度をなしている。

ここで注目すべき点は、図版-3の白色鉱物脈の共役キック帯が、脈の内部の限られた構造ではなく、母晶の石英をも巻き込んで形成されていることである。図版-3aの点1と3bの点2の部分のような脈の大きな変位は、母晶の石英にもそれに対応する変位がなくては起こらない。この母晶の石英の変位は、脈のキック帯に沿った剪断変形と対応する、剪断変形である。しかし、図版-3aの点1と3bの点2の部分のような脈の大きな変位が認められるところでも、母晶の石英に、これと対応する格子面の揺らぎ(=波動消光)は観察されない。脈のキック帯に沿った剪断変形と対応する格子面の揺らぎを伴わない母晶の石英の変形は、キック帯に沿った断層(=シア・クラック)の形成である可能性がある。しかし、ここでは、このようなクラックの痕跡は観察されない。いまま少し、他の例を検討して見よう。

図版-4aでは、白色鉱物脈は、写真中央において、共役関係にある4つのキック帯を形成している。メディアン・セグメントの幅が極端に狭くなっている。点1と点2では、極めて薄いキック帯の発達による脈の変位が認められる。しかし、これらのキック帯のまわりの石英に、これと対応する剪断変形の痕跡は認められない。図版-4b, 4c, 4dでも共役関係にあるキック帯の発達は明瞭である。図版-4dの点3を除いて、キック帯のまわりの石英に、これと対応する剪断変形の痕跡は認められない。図版-4dの点3では、脈のキック帯から母晶の石英に向かって連続発達する1つの面構造が観察される。この面構造は脈のトレンドに対して低角度である。面構造に沿って小さな消光位変化によって規定される薄い変形帯が認められる。この変形帯における格子面回転のセンスは、脈のキック帯における回転センスと同じである。これは脈のキック帯の形成に関わるまわりの石英の変形の1つの特徴を示すものであることは明らかである。

## 2.2 白色鉱物脈のキンキングを伴う石英の変形様式

脈のキック帯の形成に関わるまわりの石英の変形の様式をいまま少し検討してみよう。図版-5aの点2では、キック帯に沿ったずれによって、1つのメディアン・セグメントが、脈から離れた位置に変位しているように見える。同じような現象は、点2の周囲でも—点2の例ほど変位の量は大きくないが—観察される。キック帯に相当する位置では白色葉片状鉱物は殆ど見られなくなっている。メディアン・セグメントが、脈から離れた位置に変位しているということは、この組織が一般的な意味での共役キック帯—Biot(1965)<sup>17)</sup>のいう第二種の内

部座屈(原, 1998<sup>16)</sup>, p.50参照) — として発生した変形構造ではない可能性を示すものでもある。即ち, 石英内に発達する共役的な滑り面(シア・クラック)がもたらす変形構造としての可能性である。共役キンク帯として発生したのであれば, キンク帯の帯境界に沿った二次的なずれがもたらした構造である可能性が考えられる。いずれにせよ, メディアン・セグメントが, 脈から離れた位置に変位しているということは, この変位と対応する変形が母晶の石英になくはならないということである。それは, 図版-4dの点3に見られるような変形帯か, シア・クラックであるはずである。しかし, ここではその痕跡が見えない。

メディアン・セグメントが脈から離れた位置に変位している図版-5aの点1で見られた組織は, 図版-5c(d)においては, 脈全体をとおして発達している。キンク帯に沿ったずれによって, メディアン・セグメントが2列の縫い目のような構造を形成しているのである。図中の点4と点5においては, メディアン・セグメントが互いに重なり合うように変位している。これは, 脈のキンキングだけで説明出来る構造ではなく, キンク帯境界の断層への転換による変位を必要とする構造である。即ち, キンク帯境界に沿った変位は, 変位量と変位の形式において, キンキングだけでは説明出来ない特徴をもつということである。これに対応する母晶の石英の変形は, シア・クラックであり, クラックに沿ったスラスト・パイルが, 点4と点5のような構造をもたらしうことが出来る。脈の組織から, 母晶の石英がシア・クラックを形成するようにして変形した可能性が強く示唆される。

図版-5bにおいても脈の共役キンク帯は観察される。しかし, 点3において観察される構造は, 共役キンク帯だけで説明出来る構造ではない。ここでは白色鉍物脈は折り畳まれたような構造を形成している。この折り畳まれたような構造に伴って脈に斜交する多数の面構造が発達している。この面構造は, キンク帯と同じ特徴をもつ構造であるので, 滑り面である。したがって, 点3の脈の構造は, この面構造に沿って切断された脈のスライスが, 積み重なったことを示す構造であると説明出来る。母晶の石英にも, これと対応するようにシア・クラックによるパイリングが起こったはずである。

上記の試料では, 母晶の石英のシア・クラックの形成による変形は, 白色鉍物脈の組織を基礎とする間接的な判断であった。図版-4dの点3が唯一つの直接的情報であった。このことは, 脈の共役キンク帯が形成された時の母晶の石英の変形組織が, 後の回復によって殆ど消滅したことを示しているように見える。

次の図版-6aに見られるヒールド・クラック群は, 白色鉍物脈の共役キンク帯の形成に対応する母晶の石英のシア・クラックの僅かな痕跡である可能性がある。この図版では点2において白色鉍物脈のキンク褶曲が観察される。薄い白色鉍物脈は点1においても観察される。矢印は, 微細な黒色不透明鉍物の充填するヒールド・ク

ラックである。このヒールド・クラック群は, 白色鉍物脈を鋭角2等分線とする方向をもって発達している。岡野ほか(2001)<sup>17)</sup>は, この変形時相(剪断帯-5の時相)においては, 石英に形成されるこのようなクラックの消滅が極めて顕著なものであったことを明らかにしている。白色葉片状鉍物やカーボネイトが充填したクラックは残るが, 微細な黒色不透明鉍物の充填したクラックは容易に消滅することからすれば, 白色鉍物脈の共役キンク帯が形成された時の母晶の石英の変形組織(シア・クラック)の殆どは消滅したのであろう。

図版-6aの白色鉍物脈は, 脈に沿った累帯構造を示す。この脈内の平行帯群は, クラックが, 引っ張り割れ目としてリズムに発生-成長したことを示している(Ramsay & Huber, 1983<sup>18)</sup>参照)。図版-6bの右上の厚い白色鉍物脈もまた, 引っ張り割れ目として発生-成長したことを示唆する脈に沿った累帯構造 — 白っぽい帯(葉片状鉍物の長軸が薄片面に平行で帯に沿って配列)と黒色と白色の斑点が見える帯(葉片状鉍物の長軸が薄片面に高角度をなすように配列) — を示している。

図版-6dの白色鉍物脈にも, 図版-6bの累帯構造に比較される白っぽい帯と黒色と白色の斑点が見える帯で構成される累帯構造が観察される。しかし, 図版-6dの白色鉍物脈に見られる組織は, 2回目のクラックの開口が起こる前に, 白色鉍物脈が共役キンク帯を形成して変形していたことを示している。これは次のように説明できる。黒色と白色の斑点が見える帯は, 脈に沿ってほぼ連続して直線的に発達する。これに対して, 白っぽい帯は, 図版の上から下へ, 黒色と白色の斑点が見える帯の右側→左側→右側→左側→右側と交互に位置を変えて分布している。これは, 早期に形成された白っぽい帯(脈)が, キンク帯に沿う剪断によって, メディアン・セグメントが2列の縫い目のように配列する構造 — 図版-5c(d)の例のような構造 — を形成し, ついで2列の縫い目の間を割るように2回目のクラックが形成され開口し, そこに葉片状鉍物が充填して黒色と白色の斑点が見える帯が形成されたと説明される。

黒色と白色の斑点が見える帯は, 微弱ながらも明瞭な共役キンク帯相当の組織を示している。黒色と白色の斑点が見える帯が形成された後にも, 同じ位置で共役キンク帯の形成があった。早期の共役キンク帯が形成された時の母晶の石英の変形組織(シア・クラック)が, 後期に再活動したということであろう。図版-6dの白色鉍物脈と同じような変形史が, 図版-6bの左下の白色鉍物脈, 図版-6cの白色鉍物脈においても観察される。

かくして, 以上に記載された646.76m深度コアの石英中の白色鉍物脈の組織はいずれも, 間接的ながらも極めて明晰に, 石英が共役的なシア・クラックを形成して変形したことを示していると結論される。

### 3. 945m深度コアの石英に見られるクラック

945m深度コアを構成する岩石は両雲母ペグマタイト

である。粗粒の石英・カリ長石・斜長石を主要造岩鉱物とし、黒雲母・白雲母を僅かに伴うペグマタイトである。周囲の砂質片麻岩には顕著な片麻構造が発達するが、このペグマタイトは、片麻構造を示さず塊状である。コアの表面にはペグマタイトに微弱なクラック群が発達することを示す細く弱い条線が観察された。このような条線の配列方位を考慮して、クラック群に対して高角度配置となるような薄片を作成して顕微鏡観察を行なった。それによって、このペグマタイトが、コア表面で細く弱い条線として認められるクラック群以外に、いかなる顕著な変形組織も示さず、このクラック群の発達程度も極めて弱いものであることが明らかとなった(図版-7, 図版-8)。これは、この薄片が、クラック成長の初期段階に形成される組織の観察に極めて適したものであることを示している。このクラックは、三本ほか(2000)<sup>15)</sup>の剪断帯-5時相の変形構造に相当する。

### 3.1 クラックの区分 — C1, C2, C3

顕微鏡観察のための薄片は、上記のようにクラック群に対して高角度配置となるように作成された。20倍以下の低倍率でこの薄片を観察した時、2つの型のクラックが認められた。1つの型(C1)はちりめん皺状のうねりを示すクラックであり、いま1つの型(C2)は平滑なクラックである(図版-7a)。ちりめん皺状のうねりの包絡面は平滑である(図版-7b(c), 図版-8)。より高倍率のもとでは、C1とC2には、葉片状鉱物と黒色不透明鉱物が充填していることが観察される(図版-9c, 9d, 図版-10)。C1は粒内クラック(intracrystalline cracks), 粒界を横断するクラック(intercrystalline cracks), 粒界に沿って発達するクラック(grain boundary cracks)として観察される(図版-7, 図版-8, 図版-9)。C2は粒界を横断するクラック, そしてより一般的に粒内クラックとして発達している(図版-7a, 図版-8d, 図版-10, 図版-11a)。

200倍の倍率のもとでは、C1, C2とは異なる、更にいま1つの型(C3)の微細クラックが観察される。C3は、極めて微細な黒色不透明鉱物が充填するヒールド・クラックであり、C1, C2に比較してはるかに薄く、極めて狭いスペーシングをもって発達している(図版-11b, 11c, 11d)。一般に、C1, C2に高角度であるが、多くはそれらを切断することなく、それらに接した位置で消滅し、それらを越えて連続発達することはないように見える。C3は粒界を横断するクラックそしてより一般的に粒内クラックとして発達している(図版-11b, 11c, 11d)。C3は、この報告では詳細な記載の対象とはしない。

### 3.2 C1クラックとC2クラックの配列方位

薄片の顕微鏡観察によると、C1とC2は、ほぼ同じような方位をもって発達しているように見える。C2の配列方位をU-stageで測定した。図-2がその結果であ

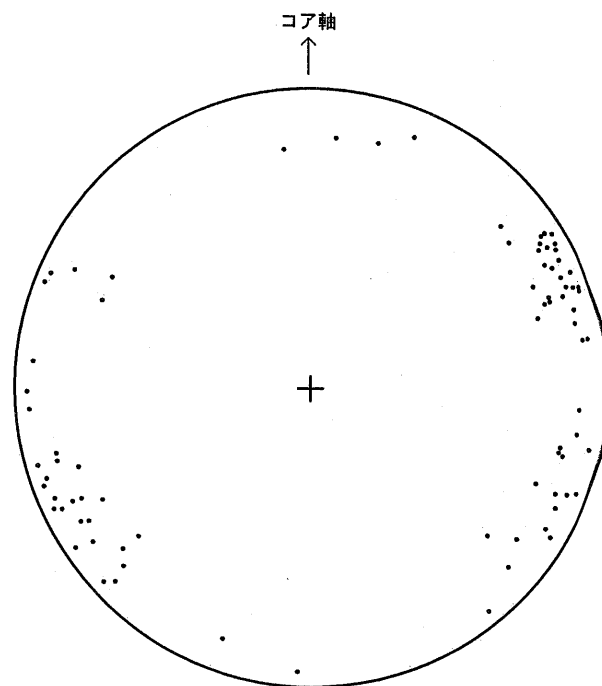


図-2 深度945mのペグマタイト・コアの石英のC2クラックの極点( $\pi$ )投影図

Fig.2  $\pi$ -diagram for C1 cracks in quartz of pegmatite core from 945m depth.

る。図から、C2は、薄片面に対して高角度であり、2つのセットを形成して発達することが読み取れる。2つのセットの交線は薄片面に垂直である。そこでC2の薄片面上での方位を測定してローズ図として示したのが、図-3aである。C2の2つのセットは約50°をなし、その鋭角2等分線の方向はコア軸にほぼ平行である。

C1のちりめん皺状にうねる面の薄片面に対する傾斜角を、U-stageで測定すると、一般に高角度である。しかし、C1のちりめん皺状のうねりの包絡面の方位を、U-stageで正確に測定することは困難であるので、包絡面の薄片面上での方位を測定してローズ図として示した。図-3bがその結果である。図から、C1は、分散を示すものの、2つの卓越する方向 — 2つのセット — をもって発達するクラックであることが読み取れる。2つのセットは約45°をなし、その鋭角2等分線の方向はコア軸にほぼ平行である。したがって、C1は、C2とほぼ同じ方位をもって発達するクラックであるが、C1の2つのセットのなす角がC2のそれより少し小さいと言えることが出来る(図-3)。

2つの型のクラックは、全く異なる形状 — 平滑な形状とちりめん皺状のうねりをもつ形状 — を示している。形成時期に相違のあることが考えられる。C2は、C1に衝突した位置で消滅し、C1を越えて連続するように発達することがないのが一般である。図版-11aの点1に見られるようにC2がC1を越えて連続するように発達することは、極めて稀である。このことはC1がC2に先立って形成されたことを示唆する(Price & Cosgrove,

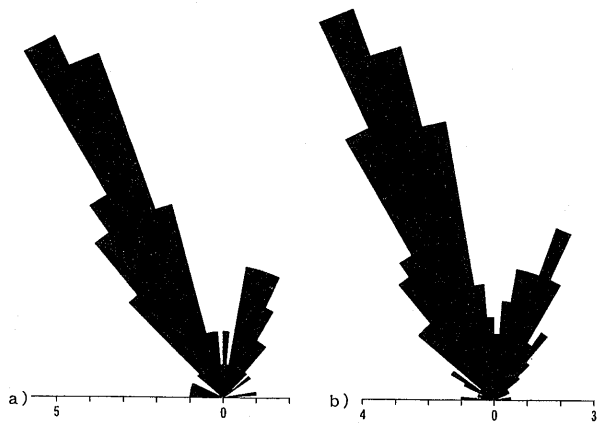


図-3 深度945mのペグマタイト・コアの石英のC2クラック(a)とC1クラック(b)のローズ図

Fig.3 Rose diagrams for C2 cracks (a) and C1 cracks (b) in quartz of pegmatite core from 945m depth.

1996<sup>19)</sup> 参照)。

### 3.3 C1クラックの形状

C1のちりめん皺状うねりは、多様な形状を示している。しかし、かなり規則性をもって発達しているように見える。このため、C1のちりめん皺状のうねりは、褶曲の記載用語で説明することが可能である。ちりめん皺状のうねりの波長は、1つのクラックではほぼ同じであるが、隣り合うクラックの間で大きく異なることがある(図版-7~図版-10)。ちりめん皺状のうねりの軸面が包絡面に対して傾斜する方向には、かなりの規則性がある。1つのクラックでは、粒界を横断する時には、粒の間で異なることがあるが、1つの粒内では同じ方向への傾斜を示す(図版-9aと9b)。このため、ちりめん皺状のうねりには対称性が認められ、斜方対称性を示すもの(=軸面⊥包絡面)、単斜対称性を示すもの(=軸面∠包絡面)がある(図版-9, 図版-10)。ちりめん皺状のうねりには寄生褶曲を伴うような形状を示すものがある(図版-10c(d))。図において、小さな波長のうねりの軸面が、大きな波長のうねりの軸面に対して配列するパターンは、寄生褶曲のそれに良く似ている。

ちりめん皺状のうねりの翼間角は多様である。開いた形状のうねりから翼間角がゼロとなる同斜状の形状のうねりまでが観察される(図版-7~図版-10)。個々のクラック内ではほぼ同じような翼間角を示すようにも見える。翼間角がゼロとなる同斜状の形状のうねりに伴って、クラックの1方の石英が島状に反対側の石英に取り込まれたことを示す組織が、ところどころで観察される(図版-7b, 図版-10)。これは、C1においては、粒界移動が起きていることを示唆する組織である。

### 3.4 C1クラック近傍の石英の変形ラメラ

図版-12a(b)は、1つの粗大石英粒内に発達するC1に沿って、動的再結晶作用によって石英の細粒化が起こっ

ていることを示している(e.g. Passchier & Trauw, 1996<sup>20)</sup> 参照)。図版-12c(d)は、その一部(図版-12a(b)の赤点)の拡大写真である。図は、C1のちりめん皺状のうねりが、動的再結晶作用によって形成された細粒石英の粒界を反映したものであることを示している。図版-12a(b)において、図版-12c(d)の位置(赤点)からC1に沿って追跡すると、動的再結晶粒が観察されなくなった位置で、C1は平滑になっている。C1のちりめん皺状のうねりの形成に、C1に沿った石英の再結晶作用(粒界移動)が関わっていることは明らかである。

図版-12c(d)の位置の動的再結晶石英粒のc軸は、クラックの両側で配列方位に規則的な変化があることを示している(図-4)。即ち、ここでは、c軸の薄片面に対する落としの角度が、クラックの両側で明瞭に異なっており、クラックの右側の粒のc軸の落としが、左側の粒のそれよりも一様に大きい。このことは、動的再結晶作用による細粒化が起こる直前に、クラックに沿って格子面のミスオリエンテーションがあったことを示すものである。このC1クラックに沿った石英粒には変形ラメラが観察される(図版-12c, 図版-13aの矢印)。この変形ラメラ(L)は、(c軸⊥L=θ)が31°であることから、subbasal I (AveLalleman & Carter, 1971<sup>21)</sup>)に相当するラメラである。これは、C1の両側の石英が結晶内格子面滑りによって変形し、格子面のミスオリエンテーションはそれによってもたらされたものであることを示している。動的再結晶作用による細粒化は、この格子面滑りによってもたらされた格子面のミスオリエンテーション(歪み)をドライヴィング・フォースとして発生した。図は、これが、C1のちりめん皺状うねりの形成の一因である事を示している。

変形ラメラは、この薄片内の5つの位置でC1に沿っ

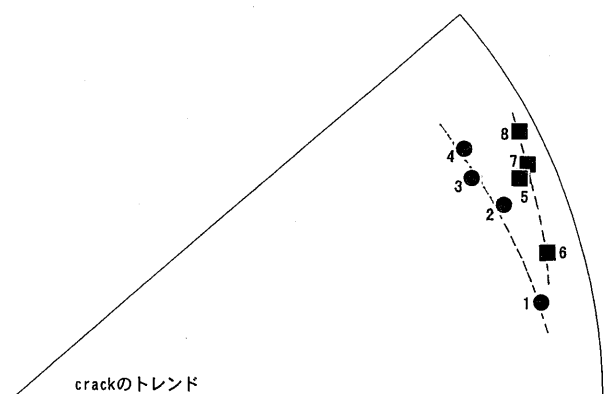


図-4 図版-12cのC1クラックのまわりの動的再結晶石英のc軸ファブリック(シュミット・ネット投影)。黒丸は図版の右側、黒四角は図版の左側の石英粒のデータ。

Fig.4 c-axis fabric diagram for dynamically recrystallized quartz around C1 crack of Plate 12c. solid circles: data for quartz grains on the right side of C1 crack, solid squares: data for quartz grains on the left side of C1 crack.

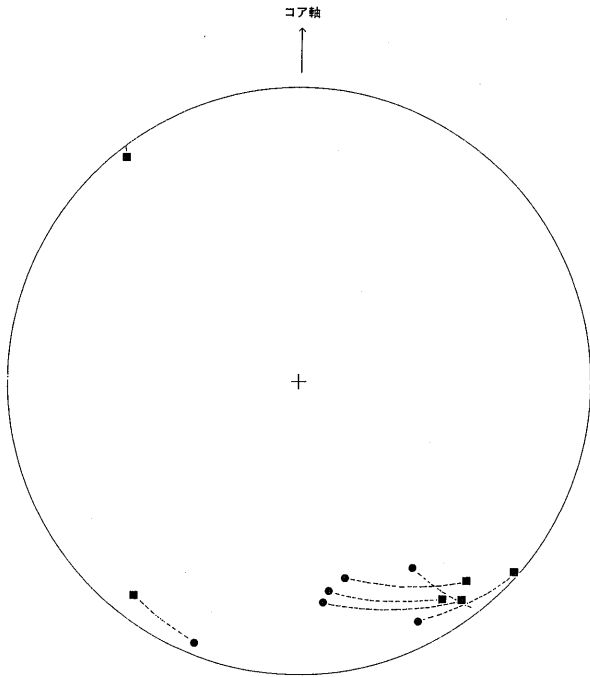


図-5 深度945mのペグマタイト・コアの石英の変形ラメラ(L)の(c軸 $\perp$ L)図。黒丸：c軸，黒四角： $\perp$ L。  
Fig.5 (c $\perp$ L) diagram for deformation lamellae of quartz of pegmatite core from 945m depth. solid circles: c-axis, solid squares: pole of deformation lamellae.

た石英から観察された(例：図版-13)。これらの変形ラメラの(c軸 $\perp$ L)関係を示したのが図-5である。 $\theta$ は $15^\circ$ から $33^\circ$ の範囲内にあり，subbasal Iに相当するラメラであると考えられる。図-5における(c軸 $\perp$ L)配置とCarter et al. (1964)<sup>22)</sup>，AveLalleman & Carter (1971)<sup>21)</sup>の実験結果から，この試料における変形ラメラの形成に関わる応力配置が推定される：最大圧縮応力の作用方向はコア軸にほぼ平行，最小圧縮応力の作用方向はコア軸にほぼ垂直で薄片面に平行。この応力配置は，C1とC2がシア・クラックであると仮定した時，C1とC2の配列パターン(鋭角2等分線方向と2つの卓越クラック群の交線；図-2と3)から想定されるそれと一致する。

図版-12c(d)の位置(図版12-aの赤点)からC1に沿って追跡すると，動的再結晶粒が観察されなくなった位置でC1は平滑になり，更にその先でC1は消滅している。C1に沿って観察されたミスオリエンテーションは，C1が消滅した位置で消滅している(図版-12a)。このような現象は，C1がシア・クラックである時のみ起こり得る現象である。C1に関わる観察結果を更に示し検討することにしよう。

### 3.5 C1クラック近傍における格子面の歪み

図版-14aの中央部に見られるC1の近傍における格子面の歪みを，まず検討して見よう。このC1のちりめ

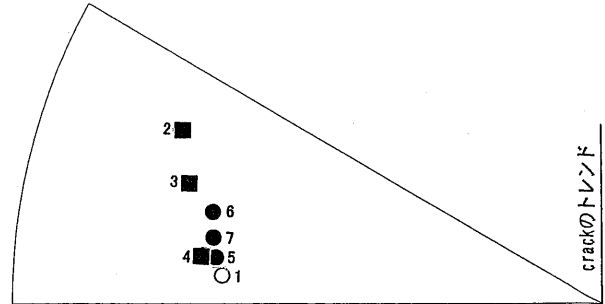


図-6 図版-14aのC1クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。黒丸：引張側の石英のc軸，黒四角：圧縮側の石英のc軸，白丸：クラックの末端のまわりの波動消光を示さない石英(図版-14aの点1)のc軸。

Fig.6 c-axis fabric diagram for undulose quartz around C1 crack of Plate 14a. solid circles: data for quartz of extensional side, solid squares: data for quartz of compressional side, open circle: data for non-undulose quartz (point 1 in Plate 14a) around tip of C1 crack.

ん皺状うねりは，かなり規則性のある特徴を示す。C1のうねりの振幅は，写真中央部付近で大きく，両側(=クラックの末端の側)へ向かって次第に減衰するように見える。C1の周りの石英には微弱ではあるが明瞭な波動消光が認められる。波動消光の帯は，C1の包絡面に高角度である。このような波動消光は，写真の右上の末端において特に顕著である。C1をシア・クラックと見做した時，図-3における配置から，右横ずれ剪断センスとみなされるため，このC1末端の点5~7側が引張場で，点2~4側が圧縮場となる。波動消光は圧縮場の側で特に顕著であり，ここでは石英の動的再結晶作用による細粒化も認められる(図版-14aの点2と点3の粒)。

この末端における格子面の揺らぎを，c軸の方位の変化として捉えた結果が，図-6に示されている。C1の末端から離れた点1の位置では格子面の揺らぎは消えている。点1から点7までの引張場では，c軸の方向変化は明瞭ではあるが小さい。これに対して，点1から点4までの圧縮場でのそれは，引張場に比べて極めて大きい。圧縮場の側では，C1が消滅した位置から点1に向かったの狭い領域でも，波動消光(格子面の揺らぎ)が認められる。そして，点1と点2の間で，c軸の方位は $20^\circ$ も変化している。点2を含む領域と点3を含む領域は，動的再結晶作用によって形成されたシャープな粒界をもつ2つの細粒石英粒である。

したがって，このC1においては，クラックに沿った格子面のミスオリエンテーションは極めて明瞭であり，クラックの両側における格子面の歪みの非対称性は極めて明瞭であり顕著であるということが出来る。C1が引張り割れ目であるとすれば，C1の両側に格子面の歪みの非対称性が現われることはない。図版-14a(図-6)のような格子面の揺らぎは，このC1を引張り割れ目

とすることでは説明出来る現象ではない。これに対して、写真のほぼ中央(点8)において、このC1を横断する長いレンズ状のクラック — 葉片状鉱物が充填 — は、その形状およびその配列方位からして、引っ張り割れ目であるように見える。このクラックの配列方位は、C1をシア・クラックと仮定した時に想定される最大圧縮応力の作用方向にほぼ平行である。ここではクラックの両側に波動消光(格子面の歪み)の非対称性は認められない。

C1においては、図版-14aの例に見られるようなクラックに沿った格子面のミスオリエンテーションは一般的なものである。それはクラックの末端部を少し越えた位置 — クラックの延長線上ではあるがクラックが認められない位置 — からクラックの中央部に向かって、その両側の消光位の変化を辿ることによって、普遍的に捉えられる現象である。図版-14b(c)もその例であるが、なおいくつかの解析例を示しておこう。

図版-15のC1に沿った消光位の変化は明瞭である。それは、U-stageによって、c軸の方位の変化として測定される程度のものである(図-7)。図の点1と点2の間では、c軸の方位の変化は約8°である。顕微鏡のステージを回転し石英の消光位を変化させて撮った図版-15aと15bによって、点3-点1の側と点4-点2の側における格子方位の相違は明瞭である。その変化はC1を挟んで極めてシャープであることは、より高倍率で撮った図版-15dから明らかである。C1に沿った格子面のミスオリエンテーションとその非対称性は明瞭である。しかし、消光位の変化から見る時(図版-15)、それは、C1の末端から始まるのではなく、C1の延長線上で末端を越えた位置 — 少なくとも点7 — まで追跡される。

次に図版-16の例を検討して見よう。図版中に観察されるC1群は、互いにほぼ平行に発達している。これら

のC1の主要部分は、粒界を横断するクラックであるが、一部は粒界に沿ったクラックである。ここで見られるちりめん皺状うねりは、いずれも翼間角が小さく、島状の取り込みも観察される(図版-16a(b))。ここでは、図版中のC1群から、同一の石英粒中に発達する2つのC1(C1a, C1b)を選び検討する。

C1aの周辺領域の石英は、極めて顕著な波動消光を示しており(図版-16c)、格子面の揺らぎは大きなものであると想定される。波動消光は帯状の組織を形成して現われており、概略2つのトレンドの帯が識別される。1つはC1aに沿った狭い帯として発達するもの(C1平行帯)であり、いま1つはC1aに高角度をなすもの(C1高角度帯)である。C1高角度帯はC1平行帯にまで連続して発達している。このC1平行帯とC1高角度帯におけるc軸の方向変化を示したのが図-8aと図-8bである。図によって、C1a近傍における格子面の歪みを検討しよう。

点5と点6はC1aの末端近くの測定点である。点5と点6の間におけるc軸の方位変化は小さい。点4と点3、点2と点1の間におけるc軸の方位変化は、点5と点6の間におけるよりは大きく、点2と点1の間では約6°である。C1aをはさんだ格子面のミスオリエンテーションとその非対称性は明瞭である。

点5→点3→点1というc軸の方位変化と、点6→点4→点2というc軸の方位変化は、C1高角度帯の発達を反映したものである。C1平行帯はC1aの右側に発達している(図版-16c)。点6と点7、点4と点8、点2と点9の間におけるc軸の方位変化は、C1平行帯を反映したものである(図-8b)。このC1平行帯の帯境界をはさんだc軸の方位変化のセンスは、C1aをはさんでのc軸の方位変化(点6と点5、点4と点3、点2と点1の間での変化; 図-8a)のセンスは同じである。したがって、c軸の方位変化から捉えられるC1aの右側のC1平行帯(点6-点4-点2領域)とその両側の領域(点5-点3-点1領域、点7-点8-点9領域)との間における格子面屈折は、キंक帯で見られる格子面屈折に比較される特徴を示すと言うことが出来る。即ち、このC1平行帯はキंक帯に比較される特徴をもち、C1aはこのキंक帯相当構造の帯境界に一致すると言うことである。

図版-16の右端にC1aと平行なC1(C1c)が発達する。このC1cに沿ってもC1平行帯が観察される(図版-16d)。波動消光から読み取れるこのC1平行帯におけるc軸の方位変化のセンスは、C1aに沿ったC1平行帯(キंक帯)におけるそれと同じである。これら2つのC1は、C1がキंक帯を伴うように発達することを示している。c軸の方位変化から読み取れるこれらのキंक帯に沿った剪断センスは、右横ずれである。C1がシア・クラックであると仮定した時に想定される応力配置(図-3の鋭角2等分線方向=最大圧縮応力の作用方向)からすれば、これらのC1に沿った剪断センスは、右横ずれ

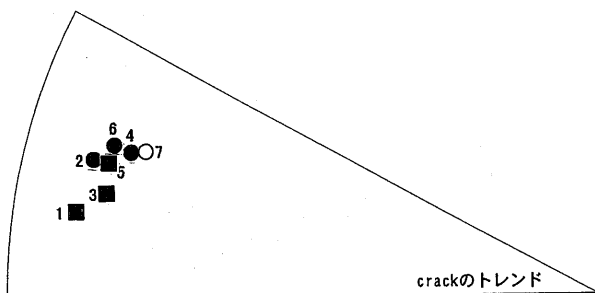


図-7 図版-15のC1クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。黒丸: 引張側の石英のc軸, 黒四角: 圧縮側の石英のc軸, 白丸: クラックの末端のまわりの波動消光を示さない石英(図版-15の点7)のc軸。

Fig.7 c-axis fabric diagram for undulose quartz around C1 crack of Plate 15. solid circles: data for quartz of extensional side, solid squares: data for quartz of compressional side, open circle: data for non-undulose quartz (point 7 in Plate 15) around tip of C1 crack.



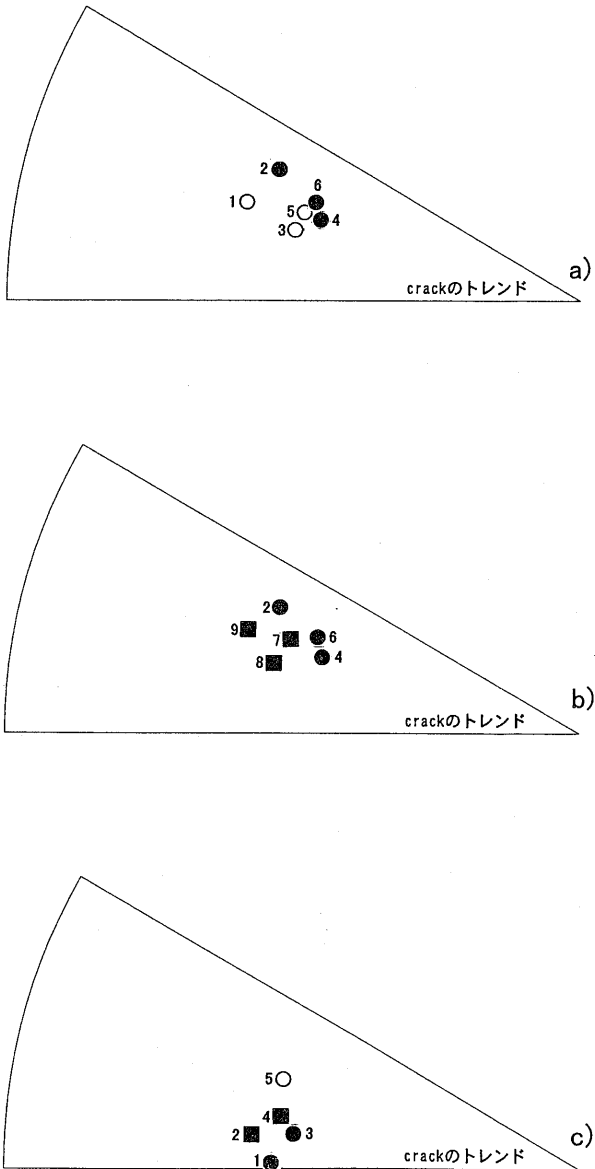


図-8 図版-16のC1クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。a: C1aクラックのデータ, b: C1aクラックに沿って発達するキンク帯のデータ, c: C1bクラックのデータ。

Fig.8 c-axis fabric diagrams for undulose quartz around C1 cracks of Plate 16. a: data for C1a crack, b: data for kink band along C1a, c: data for C1b crack.

である。これはキンク帯に沿った剪断センスと同じである。

図版-16dにおいて、C1bは、C1a、C1cと同じ石英粒中に平行に発達するC1であるが、クラック近傍における格子面の歪み像は、それらとはいくらか違っている。C1bに沿っては、C1a、C1cに沿って見られるような幅の広いC1平行帯(キンク帯)は発達しない。C1bの左側面に沿って極めて薄いC1平行帯 — c軸方位の正確な測定が困難な幅 — が認められる(図版-16d)。C1bの末端に、クラックの成長が止まるのに対応して

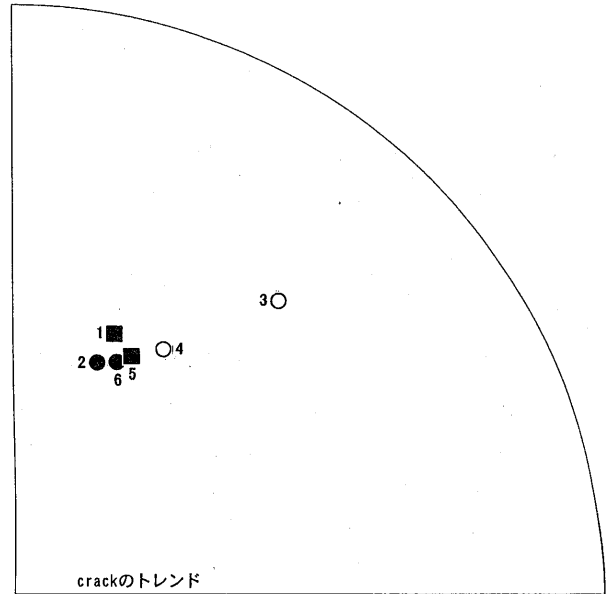


図-9 図版-17のC1クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。白丸: C1クラックの延長線上のキンク帯のデータ。

Fig.9 c-axis fabric diagram for undulose quartz around C1 crack of Plate 17. open circles: data for kink band developed on the extension line of C1 crack.

大きな格子面歪み(=大きな消光位の変化)があったことを示して、周囲とはむしろ不連続的な黒く消光した領域(点5の領域)が発達する。C1bに沿った格子面のミスオリエンテーションは、消光位の変化から見る時、この点5の領域を取り巻くようにして、点5の領域を越えて広がっている。c軸の方位変化から捉えられたC1bに沿った格子面のミスオリエンテーションとその非対称性(図-8c; 点1-点3-点5と点2-点4-点5の間の関係)は明瞭である。

図版-17のC1は写真中央において消滅している(図版-17aの点3がC1の末端)。しかし、このC1は、少し消光位を変えて見る時、この末端から先へは幅の狭いC1平行帯(キンク帯)として発達していることが読み取れる(図版-17cにおいては写真上半部中央の白い帯、図版-17dにおいては写真上半分中央の青い帯)。c軸の方位変化から捉えられた、このC1に沿った格子面のミスオリエンテーションは、図-9に示されている。C1平行帯(キンク帯; 点5→点4→点6)に見られるc軸方位変化から読み取れるC1に沿った剪断センスは、右横ずれである。C1がシア・クラックであると仮定した時に想定される応力配置(図-3の鋭角2等分線方向=最大圧縮応力の作用方向)からすれば、このC1に沿った剪断センスは、右横ずれである。これはキンク帯から読み取れる剪断センスと同じである。

このC1の末端において、クラックの成長が止まるのに対応して、点3の動的再結晶粒が形成されている。こ

これはC1の末端における大きな格子面歪みを示す現象である。この点3の動的再結晶粒の形成は、図版-16dのC1b末端における点5の領域の形成に比較される現象である。しかし、この歪み集中点をこえて、C1に沿った剪断歪みはキンク帯の形成として現れている。図版-11bの点2のC1の延長線上にもキンク帯が観察される。C1がシア・クラックとして発生・成長したものであり、それは石英がなお格子面すべりによって変形出来る条件のもとで形成されていることが明らかとなった。

### 3.6 C1クラックのオフセットにおける格子面の歪み

平行な断層セグメントがオフセットを形成することは良く知られており、ステップのまわりの応力像、歪み像は多くの研究者によって理論的にも解析されている (e. g. Segall & Pollard, 1980<sup>23</sup>)。この試料には、平行なC1クラックのステップと、平行なC2クラックのステップが観察される (例、図版-18、図版-19)。したがって、これらのクラックのステップのまわりで見られる石英の格子面の歪み像と理論的な解析結果との比較によって、C1とC2の起源に関わる情報が得られる可能性が考えられる。そこでまず、図版-18のC1クラックのステップのまわりの格子面の歪み像を検討することにしよう。

図版-18は、1つの石英粒内のほぼ同じ位置に末端部をもつ平行な3つのC1を示している。図中の上位2つのC1がステップを形成する。これらのC1のまわりで、石英の格子面に歪みが発生していることは、波動消光から明らかである。波動消光のパターンはまた、上記のC1と同様に、C1に沿った格子面のミスオリエンテーションが、その末端部を越えてクラックの延長線に沿って発達することを示している。そのことは、ステップに参加しない最下位のC1において特に顕著である。

3つのクラックを横切ったc軸の方位変化は、点9→点3→点7→点10→点11という側線で見ると (図-10b)、ほぼ1つの大円にのることを示している。このことは、この側線上では、3つのC1に沿ったミスオリエンテーションが、同一の回転軸 (=c軸の方位変化の示す大円の極) をもって起こっていると言うことである。ここでの格子面のミスオリエンテーションは、c軸の回転角で測定した時、22°と大きい。図-10b (=c軸の方位変化) から読み取れる3つのC1に沿ったミスオリエンテーションの回転センスは、右横ずれである。C1がシア・クラックであると仮定した時に想定される応力配置 (図-3の鋭角2等分線方向=最大圧縮応力の作用方向) からすれば、図版-18のC1に沿った剪断センスは、右横ずれである。したがって、C1がシア・クラックであると仮定した時に想定される剪断センスと、それに沿った格子面のミスオリエンテーションから求められた剪断センスは一致すると言うことが出来る。これは、先に記載してきた例と同様の結果である。

C1がシア・クラックであると仮定した時に想定され

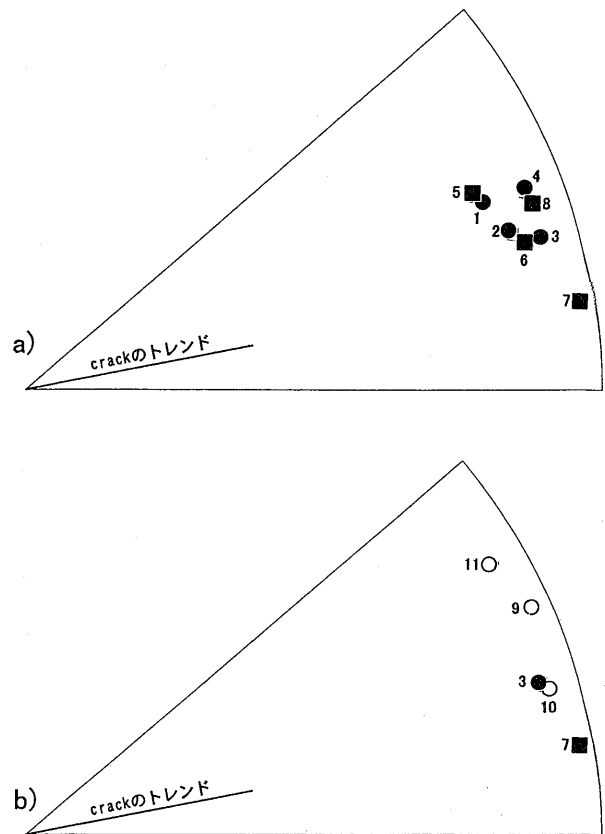


図-10 図版-18の引っ張りステップを形成するC1クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。a: ステップ内部における石英の格子面変形データ, b: 3つのC1クラックを横切る面の上で見た石英の格子面変形データ。

Fig. 10 c-axis fabric diagrams for undulose quartz around extensional step of C1 cracks of Plate 18. a: data for deformation of quartz lattice within extensional step, b: data for deformation of quartz lattice on the plane laterally across three C1 cracks.

C1に沿う剪断変形の回転軸 (=図-3のC1の2つのセットの交線=歪みの中間主軸) は、薄片面に垂直である。図版-18のC1に沿った剪断変形の回転軸は、c軸の方位変化の示す大円の極に相当する。この回転軸もまた薄片面に垂直である (図-10b)。

図版-18のC1に沿った剪断センスは右横ずれであるので、このステップはextensional stepである。一般に断層セグメントのステップのまわりは、応力、歪みの集中領域である (e. g. Segall & Pollard, 1980<sup>23</sup>)。図版-18のC1のステップにおける格子面の歪み像はどうか。写真は波動消光がこのステップにおいて特に顕著であることを示している。波動消光は、このステップ内の石英がC1平行帯によって2分されることを示している。このため、ステップ内における格子面の歪みを、このC1平行帯を考慮して点1～点4と点5～点8の2側線でのc軸の測定によって検討した (図-10a)。図における点1→点5, 点2→点6, 点3→点7, 点4→点

8に見られるc軸の回転センスの一様性から、ステップ内にC1平行帯が発達することは明らかである。ステップ内のC1平行帯に沿った格子面のミスオリエンテーション(c軸の回転角)は、点3→点7において最大(約8°)で、そこから両側(=ステップ外側の領域、点1、点5、点4、点8)へ向かって減少している。C1平行帯内における格子面のミスオリエンテーション(c軸の回転角)は、上位のC1に沿ったC1平行帯内(点1～点4)に比べて、下位のC1に沿ったC1平行帯内(点5～点8)で著しく大きく、点7と点8の間のc軸方位の回転角は12°である(図-10a)。ステップでの歪みの集中は明らかである。

かくして、図版-18のC1に沿った滑りが、C1の近傍の石英の結晶内格子面滑りを伴うようにして起こったことは明らかである。写真はまた、ステップにおける格子面の歪みが、C3の形成を伴うようにして起こっていることを示している(図版-18c(d))。

顕著なC3は、滑り面C1クラックに高角度をなして発達している。C3はまた消光位の変化する位置で、より強く発達している(図版-18cの矢印が指示するC3)。このことは、ステップにおいては、格子面歪みのポリゴン境界が、クラックへ転化したのであろう。

### 3.7 C2近傍における格子面の歪み

図版-19a(b)のクラックは平滑でありC2に属するものである。4つのC2が2つのステップを形成している。下位の2つのC2は粒内に両端の末端をもつ短いクラックである。図版内で石英の消光位は大きく変化するが、写真は1つの大きな石英粒内の部分を示している。波動消光のパターンは、上記のC1における場合と同様に、C2に沿った格子面のミスオリエンテーション、ステップにおけるより顕著なミスオリエンテーションが起こっていることを示している。図版-19a(b)の右側の2つのC2に沿ったc軸の方位変化によって検討しよう(図-11a)。

図-11から、C2に沿った格子面のミスオリエンテーションは明瞭である。ステップにおいては大きな格子変位を示す動的再結晶粒(点7の粒)が形成されている。左隣のステップにおいても同様の現象が起こっていることが読み取れる。これらのことは、平滑な面をもつC2—短い粒内クラック—が近傍の母晶石英に格子面の非対称歪みを伴うようにして起こったシア・クラックであることを説明する現象である。

図版-19cのC2クラックもまた粒内に両端の末端を持つ短いクラックである。図版内には、これらのクラックが作る2つのステップが観察される。波動消光は、ステップにおける石英の格子面の歪みを示唆するが、c軸の方位の測定結果から(図-11b)、この事は明確に示されている。c軸の方位変化は、図版-19aのC2と同様、このC2もまた右横ずれ剪断のシア・クラックである事を示している。C2がシア・クラックであると仮定した

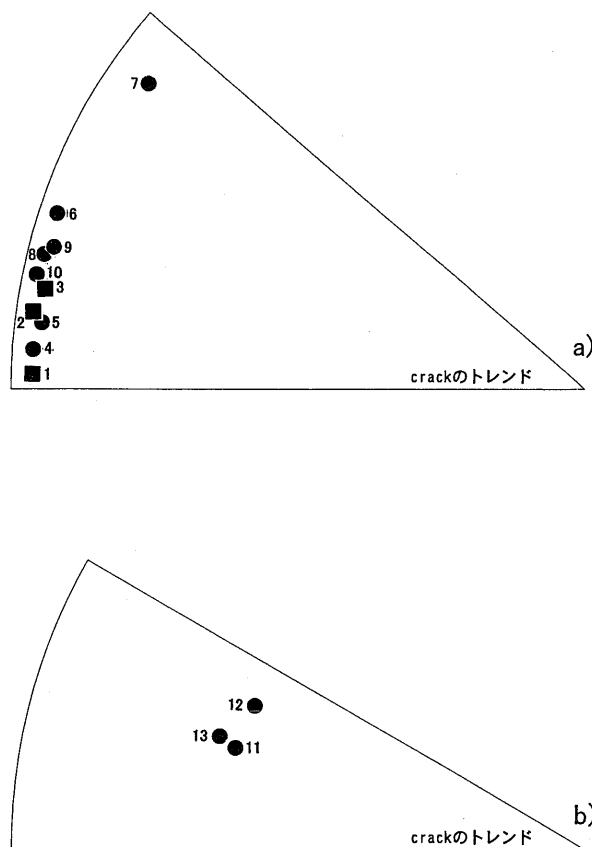


図-11 図版-19の引張りステップを形成するC2クラックのまわりの波動消光石英のc軸ファブリック。a: 図版-19a(b)のデータ, b: 図版-19cのデータ。

Fig.11 c-axis fabric diagrams for undulose quartz around extensional steps of C2 cracks of Plate 19. a: data for extensional step of Plate 19a(b), b: data for extensional step of Plate 19c.

時に想定される応力配置(図-3の鋭角2等分線方向=最大圧縮応力の作用方向)からすれば、このC2に沿った剪断センスは、右横ずれである。これはc軸の方位変化から読み取られたこれらのC2の剪断センスと同じである。

以上に論証してきたように、C1とC2はいずれも、クラックに沿った塑性的な格子面歪みを伴うシア・クラックとして発生-成長した。早期に出現したC1では、クラックに沿ったより大きな変位がもたらしたより大きな塑性的な格子面歪みの歪みエネルギーをドライヴィング・フォースとする再結晶作用・粒界移動により、平滑なクラック面のちりめん皺状の形状への変化が起こったのである。

## 4. 考察と結論

岩石鉱物結晶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)<sup>24)</sup>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, 1976<sup>6)</sup>;

Kranz, 1979a<sup>25)</sup>; Wong, 1980<sup>26)</sup>), with little shear motion between the crack surfaces.」と述べ, intercrystalline cracks については「In mechanically stressed rock, the tip-to-tip intercrystalline crack orientations are usually subparallel to the macroscopic maximum stress direction.」と述べている。Kranz (1983)<sup>24)</sup> はまた, 「Cleavage cracks are an important enough subject of intracrystalline cracks to be considered separately. They are separations along cleavage planes in minerals and as such are petrographically useful. …… Frequently observed cleavage cracks occur in quartz along the r, z directions (e.g. Swolfs, 1972<sup>27)</sup>; Martin and Durham, 1975<sup>28)</sup>; Dunning, 1978<sup>29)</sup>), …… Cleavage planes in crystals are generally those planes with the lowest bond density or strength, and lowest surface energy (Brace and Walsh, 1962<sup>30)</sup>, supporting theory of Gilman, 1959<sup>31)</sup>). Thus in suitably oriented grains, strain energy stored in the grain as a result of applied stresses will tend to be relieved on those planes first.」と指摘している。

Chelmsford granite シリンダーの封圧実験を行なった Peng & Johnson (1972)<sup>5)</sup>, Westerly granite シリンダーの封圧実験を行なった Wong (1982)<sup>7)</sup>, コーツァイト・シリンダーの封圧実験を行なった Haulbauer et al. (1973)<sup>4)</sup> は, 圧縮応力の作用方向に平行な axial cracks が形成され, 断層はその崩壊として発生することを明らかにしている。Moore & Lockner (1995)<sup>8)</sup> もまた, Westerly granite シリンダーの圧縮実験において, 断層の成長に関わるプロセス・ゾーンに形成されるクラックは, 「principally tensile cracks whose orientations reflect the local stress field」であると説明している。Lac du Bonnet granite シリンダーの圧縮実験により, Lajtai (1998)<sup>32)</sup> は, 「It is clear that by far the majority of microcracks are oriented within narrow range about the compressive stress direction. These are the axial microcracks.」と述べている。また, 封圧下で Berea 砂岩 シリンダーの圧縮実験を行なった Menendez et al. (1996)<sup>33)</sup> は, 「Near the peak stress, intragranular cracking initiates from grain contacts and this type of Hertzian fracture first develops in isolated clusters, and their subsequent coalescence results in shear localization in the post-failure stage」 と結論している。これらの実験結果から見るかぎり, 石英中に形成される初生クラックは, 一般に引っ張り割れ目(モード-I)である。実験では石英中に初生的に剪断割れ目(モード-II)としてのクラックが発生した例はないように見える。

しかし, 本報告において解析した2つの試料(646.76m深度コアと945m深度コア)の石英に見られた組織は, 石英が, シア・クラックを形成するようにして変形することを示すものであった。646.76m深度コアの石英から

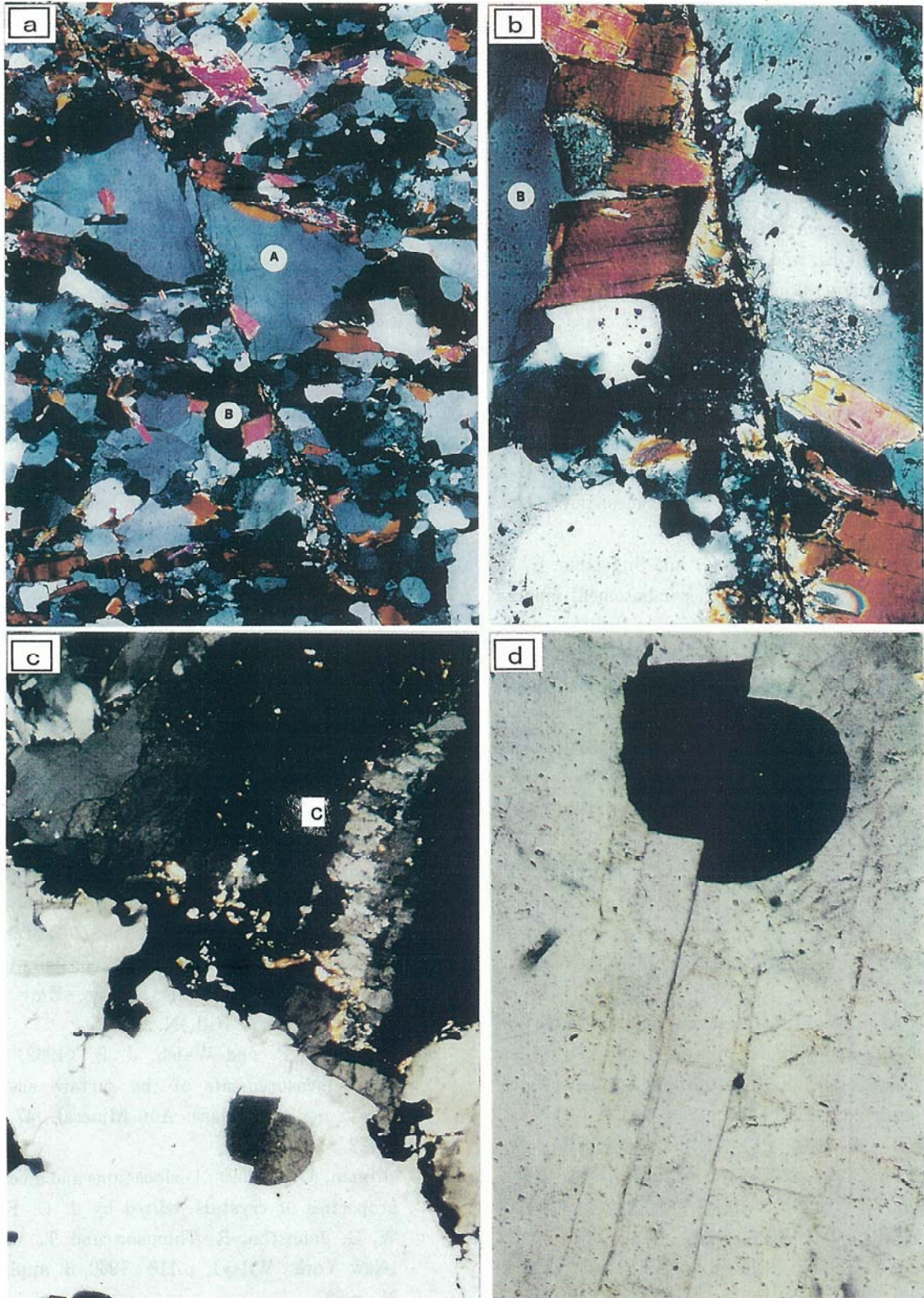
の情報は, 間接的なものであった。この試料では, 石英はまず, 葉片状鉱物の充填する引っ張り割れ目(=白色鉱物脈の形成)として発生した。この白色鉱物脈が受けた重複変形作用が共役キンク帯の形成であった。共役キンク帯に沿った剪断変形は, キンク帯は白色鉱物脈の内部構造ではなく, キンク帯の延長線上において, 母晶(石英)もまた剪断変形を受けたことを示す構造であった。母晶(石英)の剪断変形は, 共役シア・クラックの形成によるもとであると判断された。

945m深度コアの石英からの情報は, 直接的なものであり, 石英が共役シア・クラックを形成するようにして変形する事を示唆するものであった。石英におけるシア・クラックの発生-成長は, クラック近傍の格子面歪みを伴うようにして起こり, クラックの先端にはキンク帯が形成される。クラック近傍の格子面歪みは, subbasal I 変形ラメラの形成と動的再結晶作用をもたらすものであった。岡野ほか(2001<sup>1)</sup>, 図版-9, 図版-10)が記載した試料においても, 断層としての石英のクラックに沿って石英の動的再結晶粒が形成されていることを示すものがあつた。これらの事実は石英においてシア・クラックが発生-成長する条件は, 石英が脆性的にも延性的にも変形できるような条件であることを示している。これは石英の brittle-ductile transition における変形特性を示すものなのであろうか。このような条件での断層の微細機構が, 上記の多く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, 変形条件の差を反映したものであるように考えられる。

#### 参 考 文 献

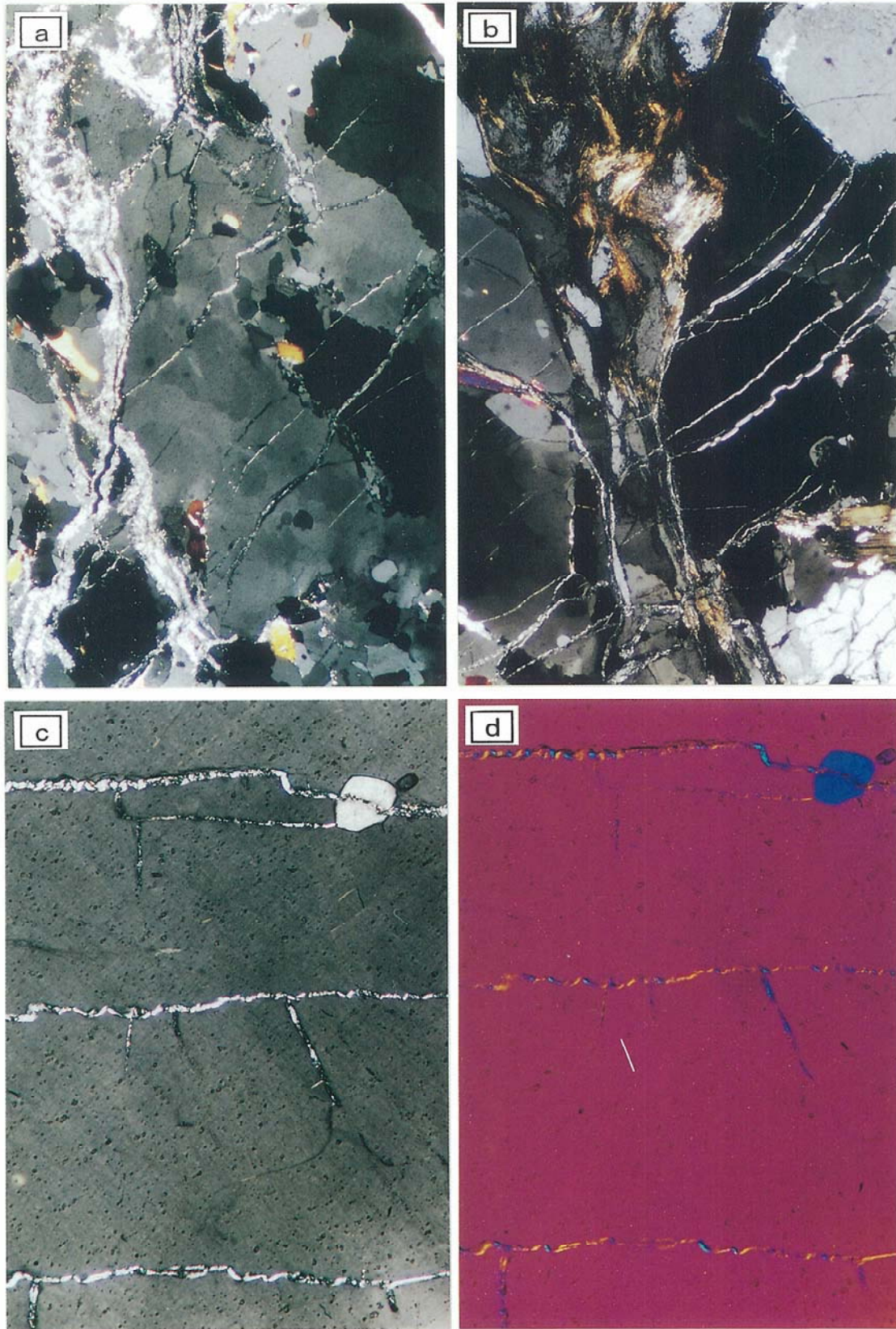
- 1) 岡野 肇・妹尾洋一・三本健四郎・真鍋弘道・山根誠・吉田 浩・原 郁夫(2001): つくば技術開発センター-1350mボーリングコアの地質学(2)745.1m深度の砂質片麻岩中の微小断層群-脆性断層の微細機構-。応用地質技術年報。No.21, p.41-79.
- 2) Scholz, C. H. (1968): Experimental study of the fracturing process in brittle rock, *J. Geophys. Res.* vol.73, p.1417-1454.
- 3) Friedman, M., Perkins, R. D., and Green, S. J. (1970): Observation of brittle deformation features fractures at the maximum stress of Westerly granite and Solenhofen limestone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* vol.7, p.297-306.
- 4) Hallbauer, 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. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 10, p.713-726.
- 5) Peng, S. S., and Johnson, A. M. (1972): Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock Mech. Min.*

- Sci. vol.9, p.37-86.
- 6) Tapponier, P., and Brace, W. F. (1976) : Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* vol.13, p.103-112.
  - 7) Wong, T. F. (1982) : Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol.19, p.49-64.
  - 8) Moore, D. E., and Lockner, D. A. (1995) : The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *J. Struc. Geol.* vol.17, no.1, p.95-114.
  - 9) Skempton, A. W. (1966) : Some observations on tectonic shear zones. *Proc. 1st Inter. Cong. Rock Mech.* vol.1, p.329-335.
  - 10) Tchalenko, J. S. (1970) : Similarities between shear zones of different magnitudes. *Bull. Geol. Soc. Am.* vol. 81, p.155-160.
  - 11) Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpestein, C. H. K., (1986) : Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *J. Struc. Geol.* vol. 7(8), p.737-752.
  - 12) Moore, D. E., Summers, R. and Byerlee, J. D. (1986) : The effect of sliding velocity on the frictional and physical properties of heated fault gauge. in [internal Structures of Fault Zones] edited by Chi-yuen Wang. Basel, Birkhauser Verlag, p.31-52.
  - 13) 原 郁夫・三本健四郎・山根 誠・妹尾洋一・岡野 肇・吉田 浩 (2002) : 石英のクラック2つの型ー応用地質つくば技術開発センター1350mボーリングからの例. 日本地質学会第109年学術大会講演要旨, p. 115.
  - 14) Vernon, R. H. (1987) : Growth and concentration of fibrous sillimanite related to heterogeneous deformation in K-feldspar-sillimanite metapelites. *J. Mtam. Geol.*, Vol.5, p.51-68.
  - 15) 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, p. 43-86.
  - 16) 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, 225p.
  - 17) Biot, M. A., (1965) : *Mechanics of Incremental Deformation.* John Wiley & Sons.
  - 18) Ramsay, J. G. and Huber, M. I. (1983) : *The techniques of modern structural geology.* Vol.2. Academic Press.
  - 19) Price, N. J. and Cosgrove, J. W. (1996) : *Analysis of geological structures.* Cambridge University Press.
  - 20) Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J. (1996) : *Microtectonics.* Berlin, Springer-Verlag, p.289.
  - 21) AveLalleman, H. G. and Carter, N. L. (1971) : Pressure dependence of quartz deformation lamellae orientations. *Am. J. Sci.*, 270. p.218-235.
  - 22) Carter, N. L., Christie, J. M. and Griggs, D. T. (1964) : Experimental deformation and recrystallization of quartz. *J. Geol.*, 72. p.687-733.
  - 23) Segall, P. and Pollard, D. D. (1980) : Mechanics of discontinuous faults. *J. Geophys. Res.*, Vol. 85. p.4337-4350.
  - 24) Kranz, R. L. (1983) : Microcracks in rocks : a review. *Tectonophysics*, 100. p.449-480.
  - 25) Kranz, R. L. (1979a) : Crack growth and development during creep of Barre granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 16. p.23-35.
  - 26) Wong, T-F. (1980) : Post-failure behavior of Westerly granite at elevated temperatures. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
  - 27) Swolfs, H. S. (1972) : Chemical effects of pore fluids on rock properties. *Am. Assoc. Petrol. Geol. Mem.*, 18. p.224-233.
  - 28) Martin, R. J. and Durham, W. B. (1975) : Mechanisms of crack growth in quartz. *J. Geophys. Res.*, 80. p.4837-4844.
  - 29) 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.
  - 30) Brace, W. F. and Walsh, J. B. (1962) : Some direct measurements of the surface energy of quartz and orthoclase. *Am. Mineral.*, 47. p.1111-1122.
  - 31) Gilman, J. J. (1959) : *Dislocations and mechanical properties of crystals*, edited by J. C. Fisher, W. G. Johnston, R. Thomson and T. Vreeland (New York : Wiley), p.116 ; 1960, *J. appl. Phys.* 31. p.687.
  - 32) Lajtai, E. Z. (1998) : Microscopic fracture processes in a granite. *Rock Mech. Rock Engng.* 31, 4. p.237-250.
  - 33) Menendez, B., Zhu, W., and Won, T. F. (1996) : Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Berea sandstone. *J. Struc. Geol.* vol. 18, no.1, p.1-16.



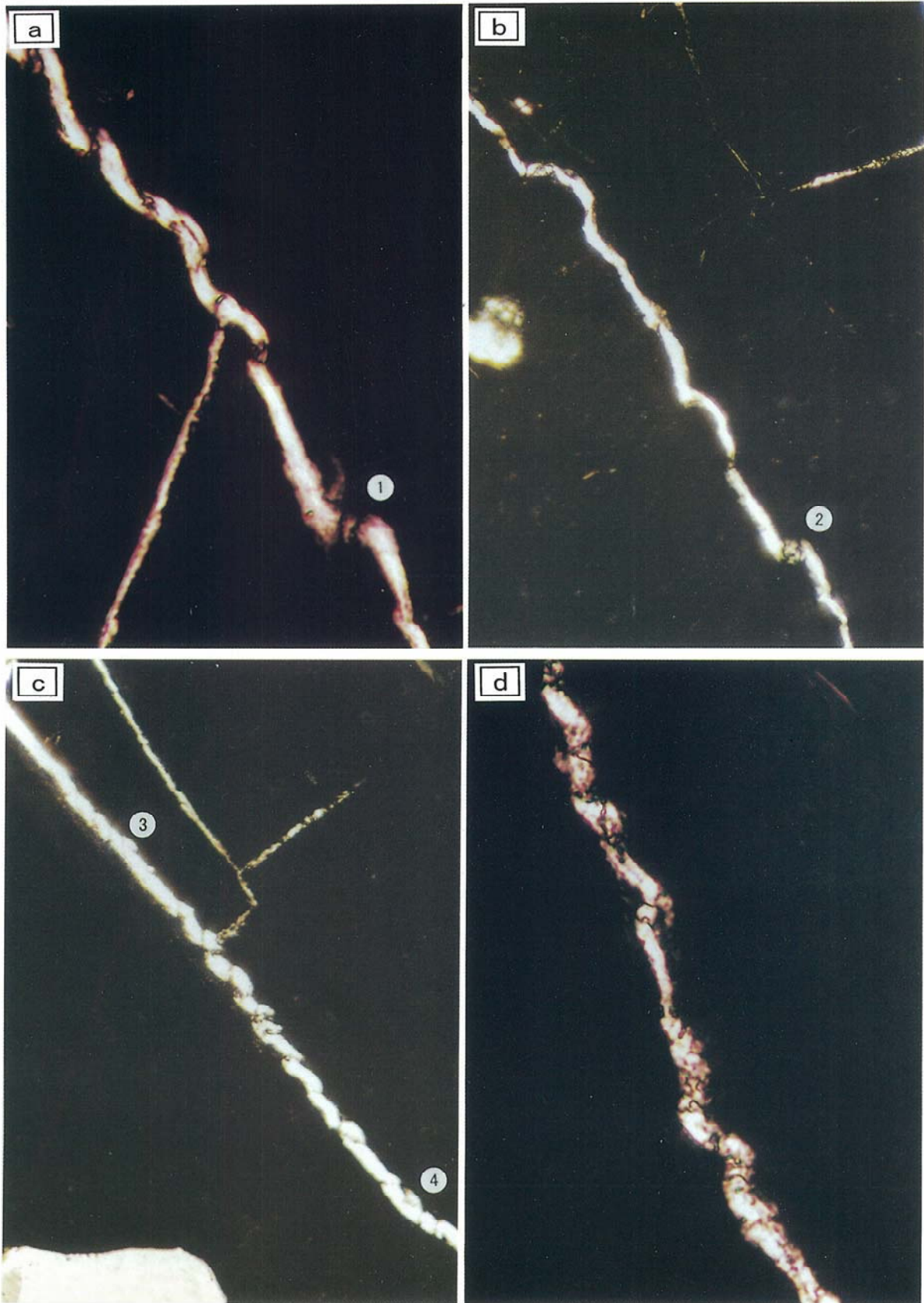
図版-1 aとb: 石英(A)を切断するクラックとクラックに沿った剪断滑りによって形成された黒雲母のひきずり褶曲(B) (深度645.75mからの試料) (a: 20倍観察, b: 50倍観察)。c: 石英と包有斜長石を切断するクラック (20倍観察) — d) はその拡大写真 (200倍観察) — と斜長石のキンク帯 (点C) (深度780mからの試料)。キンク帯に沿った剪断センスは石英中のクラックのそれと同じである。

Plate-1 a and b: Crack cutting across quartz (A) and drag fold of biotite flakes (B) produced by slip along the crack (sample from 645.75m depth). c: Crack cutting across quartz and its inclusion plagioclase — d is an enlarged micrograph for those textures — and kink band of plagioclase at point C, whose shear sense is harmonic with that along the crack in quartz (sample from 780m depth).



図版-2 aとb: 深度646.76mの砂質片麻岩中のフィブロライト・フォリアと白色葉片状鉱物の充填するクラック群(白色鉱物脈)を示す顕微鏡写真(20倍観察)。cとd: 石英中の微細な皺状形態を示す白色鉱物脈の顕微鏡写真(50倍観察), dはジプサム・プレートの下で撮影したもの(深度646.76mからの資料)。

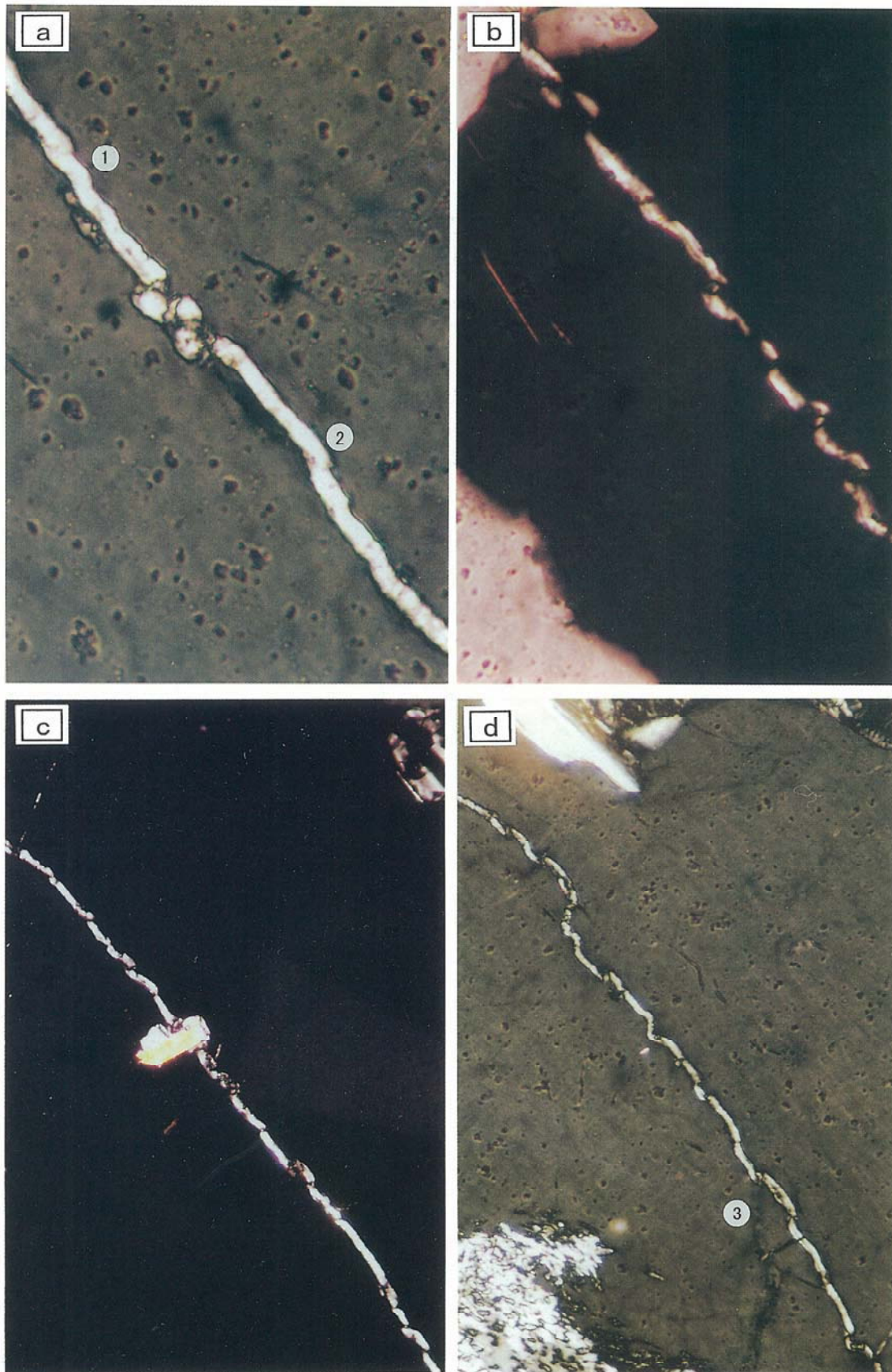
Plate-2 a and b: Micrographs showing fibrolite folia and white flaky mineral-filled cracks (white mineral veins) in psammitic gneiss from 646.76m depth. c and d: Micrographs showing white mineral veins with crinkle shapes under crossed nicols (c) and gypsum plate (d) (data from 646.76m depth).



図版-3 石英中の白色鉱物脈の多様な皺状形態を示す顕微鏡写真（200倍観察）。皺状形態は共役キンク帯に対比される構造である（深度646.76mからの資料）。点1～点4の説明は本文参照。

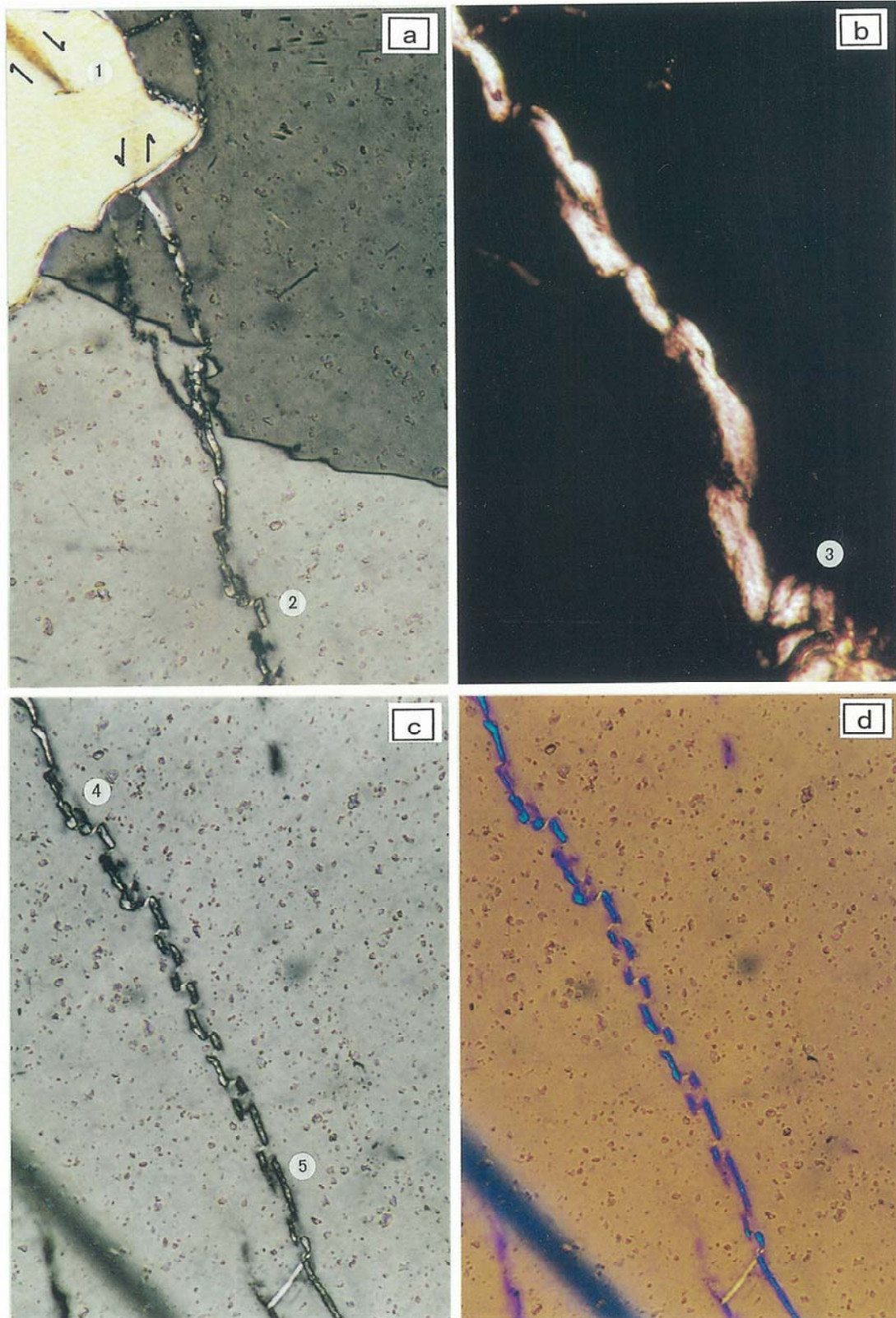
Plate-3 Micrographs showing various crinkle shapes of white mineral veins in quartz (data from 646.76m depth). For explanation of points 1~4 see the text.





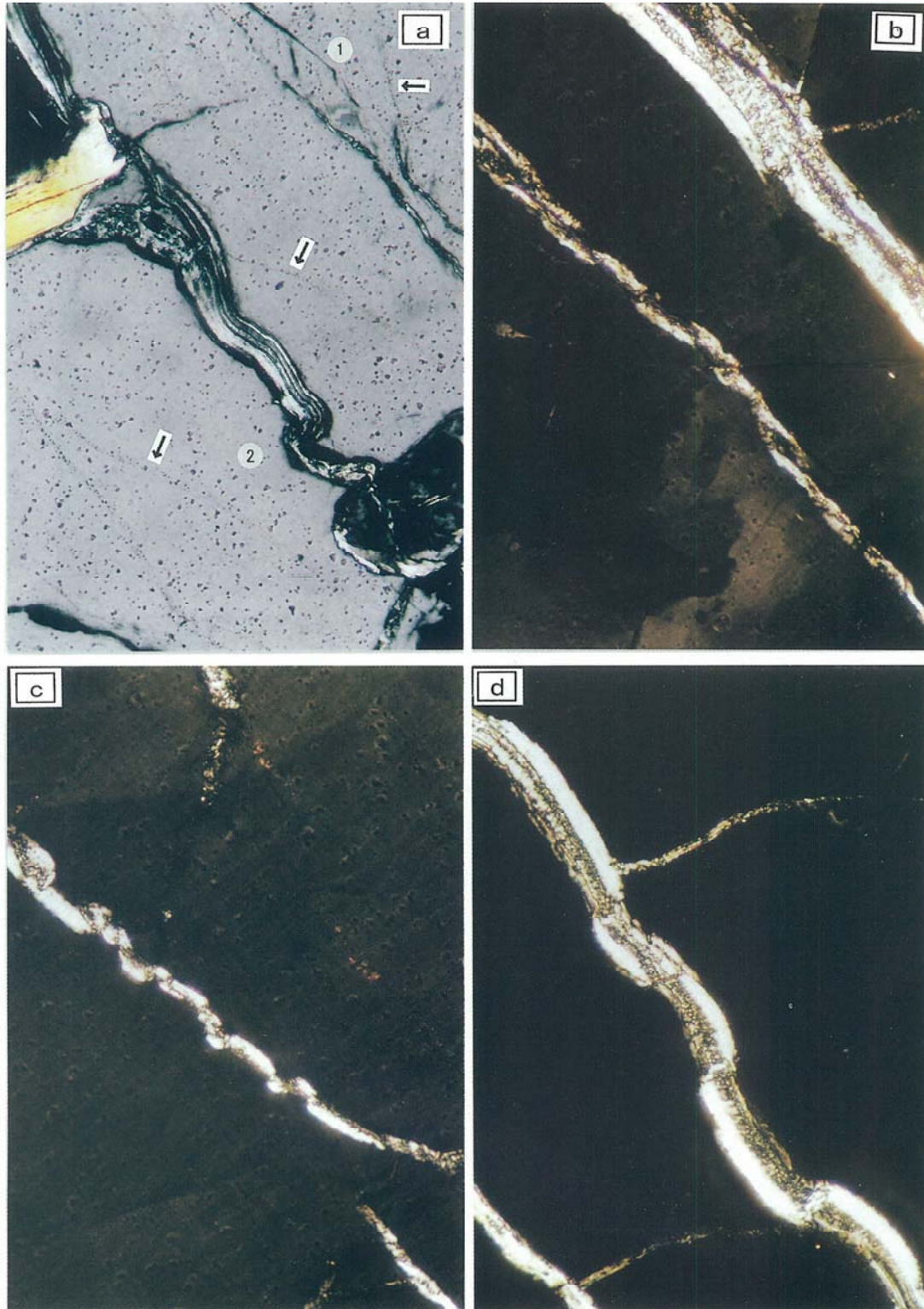
図版-4 石英中の白色鉱物脈の多様な皺状形態を示す顕微鏡写真(200倍観察)。皺状形態は其役キンク帯に対比される構造である(深度646.76mからの資料)。点1~点3の説明は本文参照。

Plate-4 Micrographs showing various crinkle shapes of white mineral veins in quartz (data from 646.76m depth). For explanation of points 1~3 see the text.



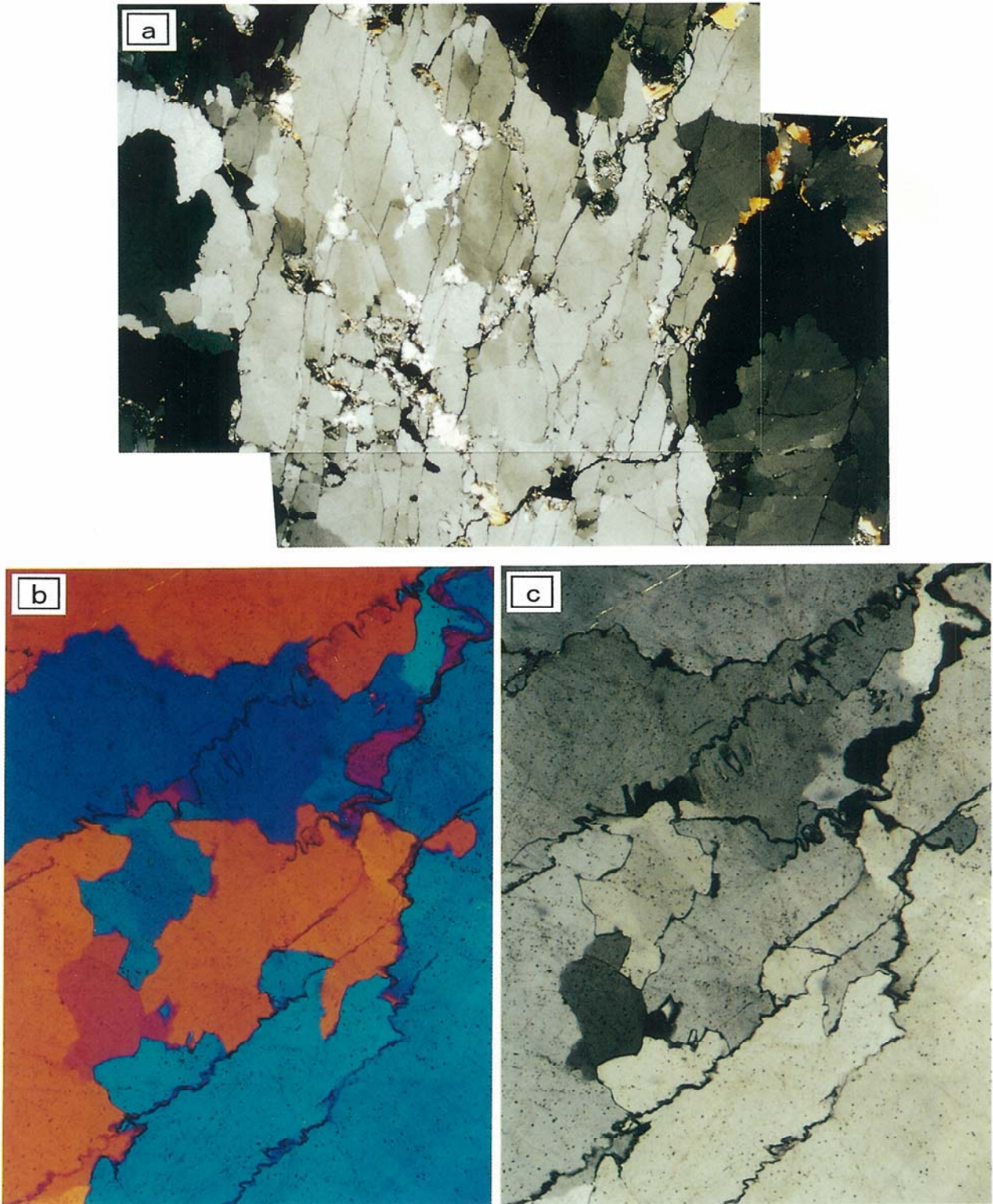
図版-5 石英中の白色鉱物脈の多様な皺状形態を示す顕微鏡写真(200倍観察)。皺状形態は共役キンク帯に対比される構造である(深度646.76mからの資料)。図版-5dは図版-5cをジプサム・プレートの下で撮影したもの。点1:黒雲母中の共役キンク帯。その形成に関わる圧縮応力は白色鉱物脈に平行。点2~点5の説明は本文参照。

Plate-5 Micrographs showing various crinkle shapes of white mineral veins in quartz (data from 646.76m depth). Plate-5d is a micrograph under gypsum plate for Plate-5c. point 1: kink bands in biotite, which suggests the orientation of the compressive stress parallel to the white mineral vein. For explanation of points 2~5 see the text.



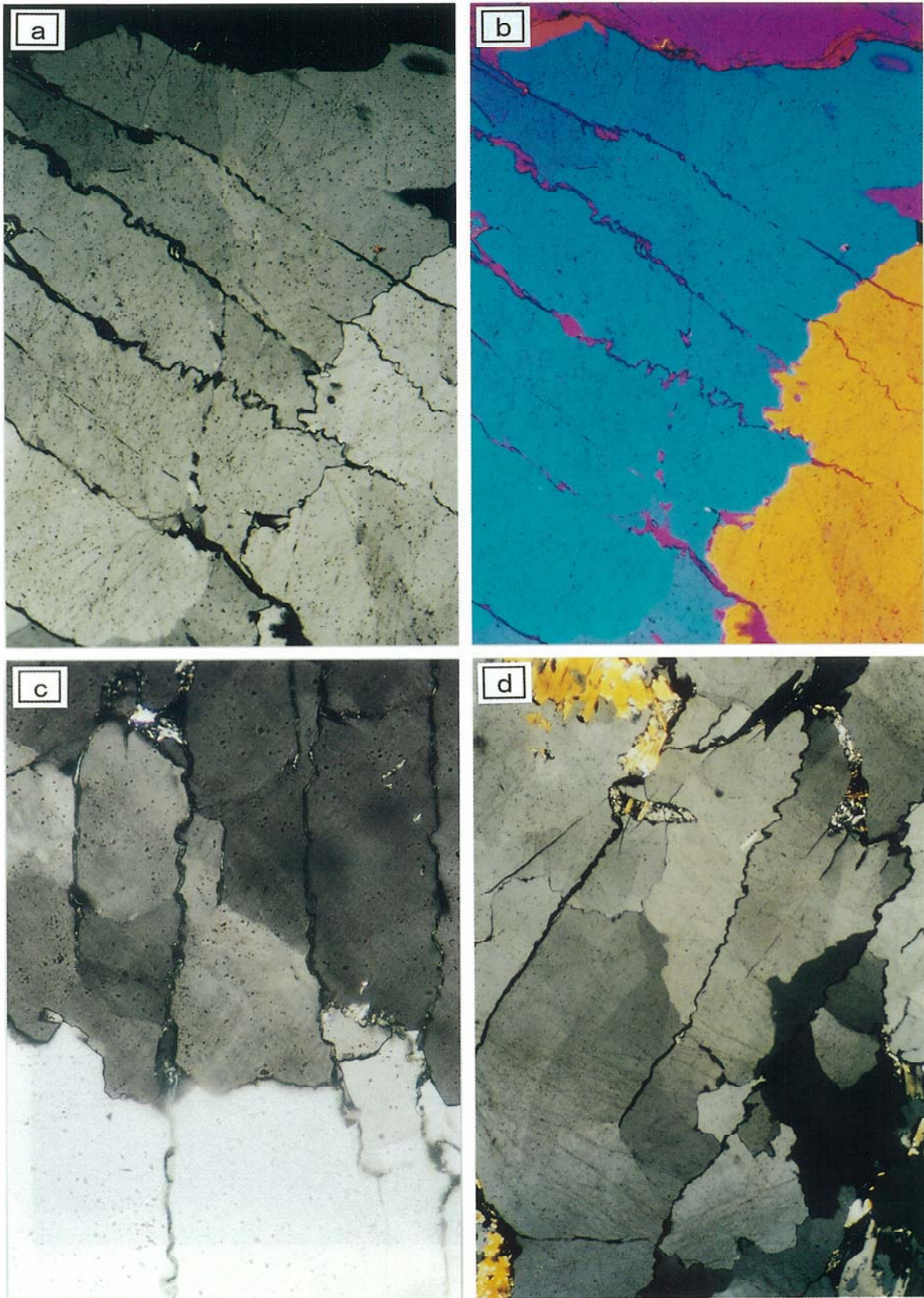
図版-6 石英中の白色鉱物脈の脈平行累帯構造(200倍観察)。脈が引っ張り割れ目起源であることを示す顕微鏡写真(深度646.76 mからの資料)。a) の点1: 白色鉱物脈とそれに低角度で斜交するヒールド・クラック(矢印), a) の点2: 脈平行累帯構造を破壊しながら発達するキンク帯。b, c, d: 引っ張り割れ目(脈)の形成と脈のキンキングが石英中の同じ位置で繰り返し起こったことを示す。

Plate-6 Micrographs showing vein-parallel zonal structures in white mineral veins, which indicate that the veins are extensional cracks in origin (data from 646.76m depth). point 1 in Plate-6a: healed cracks (arrows) oriented in low angles to the white mineral veins. point 2 in Plate-6a: kink band of white mineral vein, which cuts across its vein-parallel zonal structure. b, c and d: microtextures of white mineral veins, which indicate that extensional cracking and kinking occurred repeatedly in the same positions in a quartz grain.



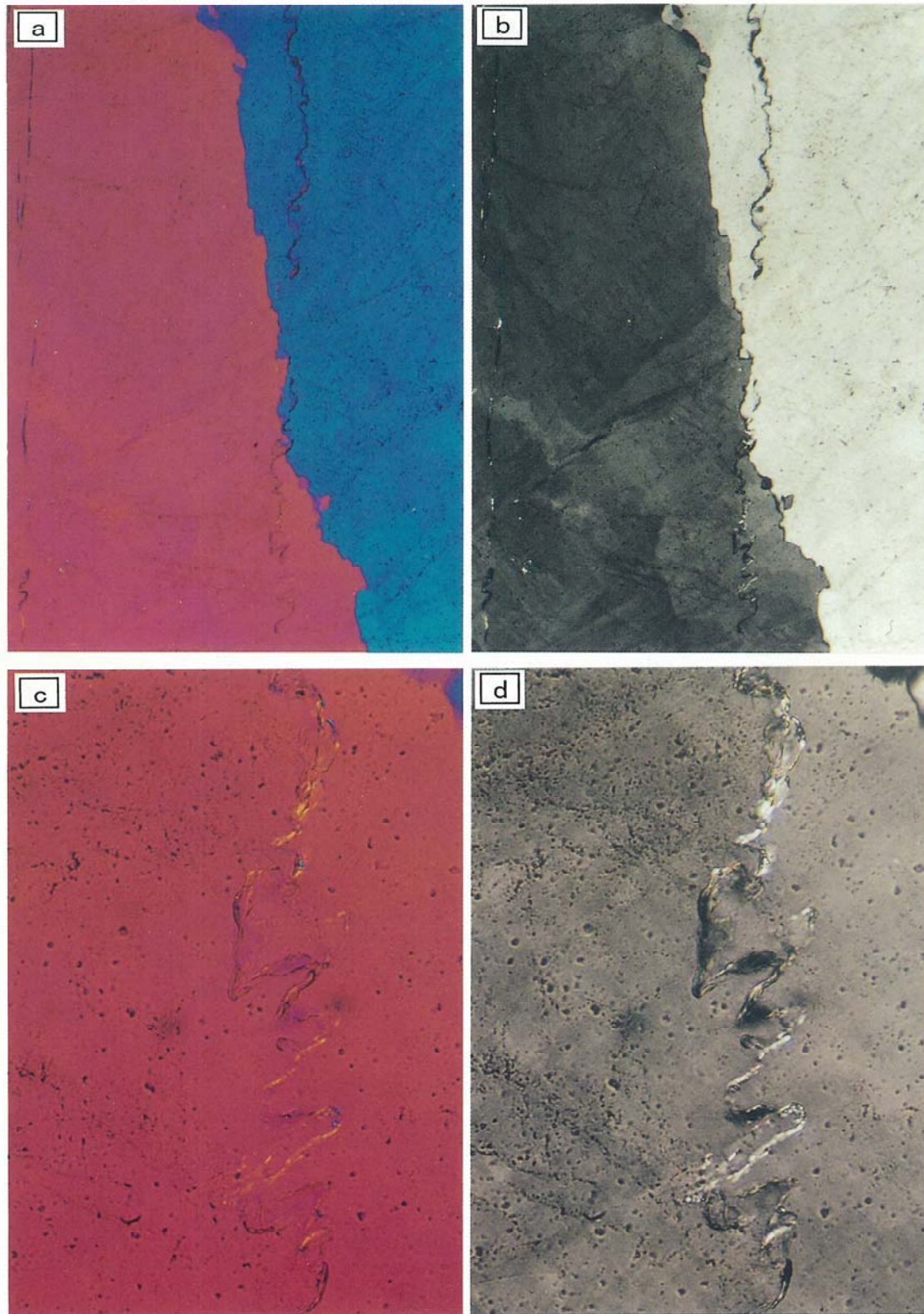
図版-7 a : 深度945mのペグマタイトの石英中に発達する共役クラックの2つの型を示す顕微鏡写真 (20倍観察)。ちりめん皺状の形態を示すクラック (C1) と平滑なクラック (C2)。bとc : 多様な形態をもつ平行なC1を示す顕微鏡写真 (クロス・ニコル下 (c) とジプサム・プレート下 (b) で撮影) (50倍観察)。説明の詳細は本文。

Plate-7 Micrographs showing two types of cracks of conjugate sets in quartz of pegmatite from 945m depth, which are C1 cracks with walls of crinkle shapes and C2 cracks with planar walls. b and c: micrographs showing various shapes of C1 developed in parallel set (under crossed nicols (c) and gypsum plate (b)). For fuller explanation see the text.



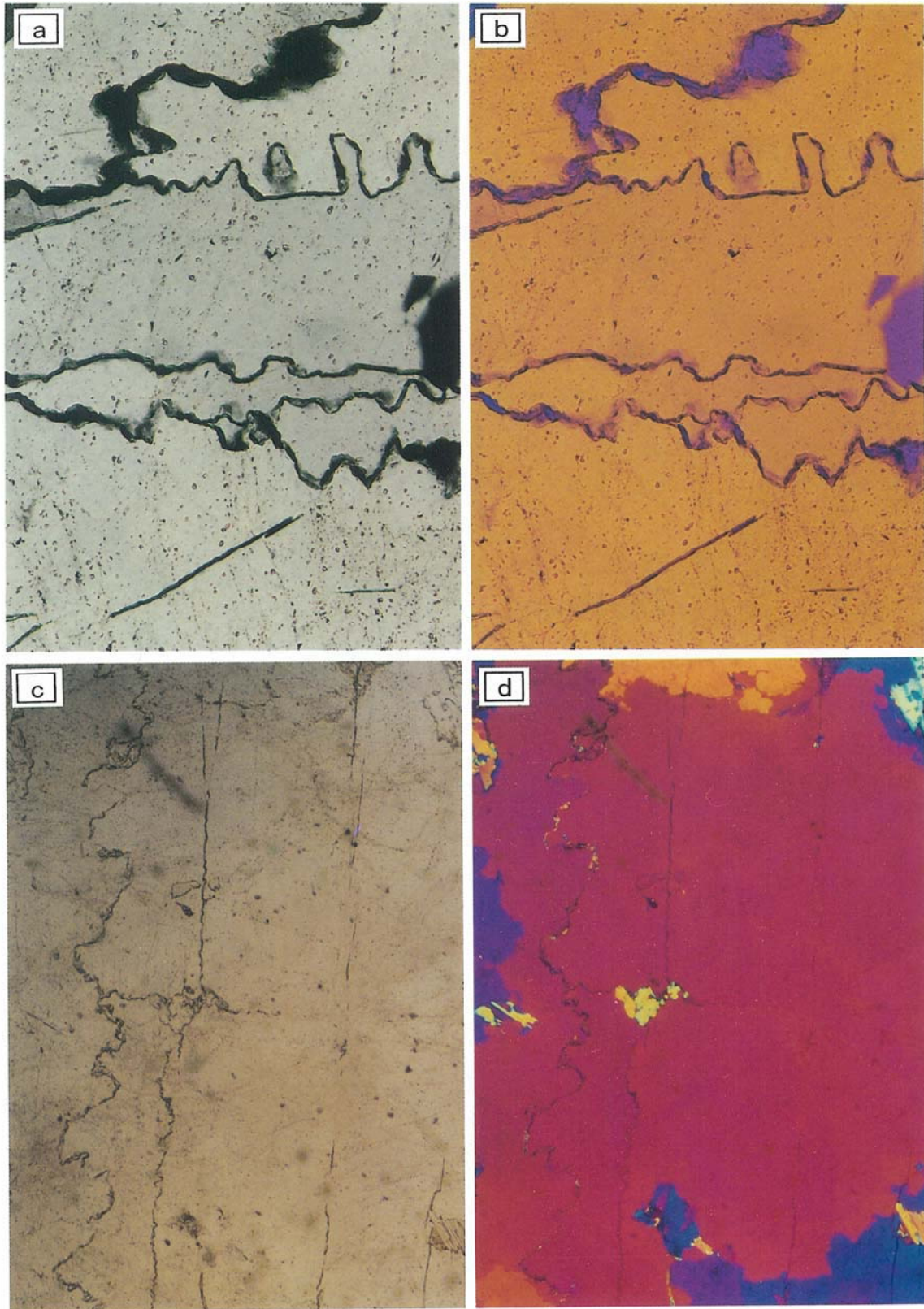
図版-8 C1とC2の顕微鏡写真(深度945mからの資料:以下の図版同様)(50倍観察)。C1は粒界を横断するクラック, C2は粒内クラック。aとc:クロス・ニコル下(c)とジプサム・プレート下(b)での顕微鏡写真。cとd:C1とC2の末端が認められる顕微鏡写真。

Plate-8 Micrographs showing C1 cracks as intercrystalline type and C2 cracks as intracrystalline type (data from 945m depth). a and b: micrographs for C1 and C2 under crossed nicols (a) and gypsum plate (b). c and d: micrographs showing tips of C1 cracks and C2 cracks.



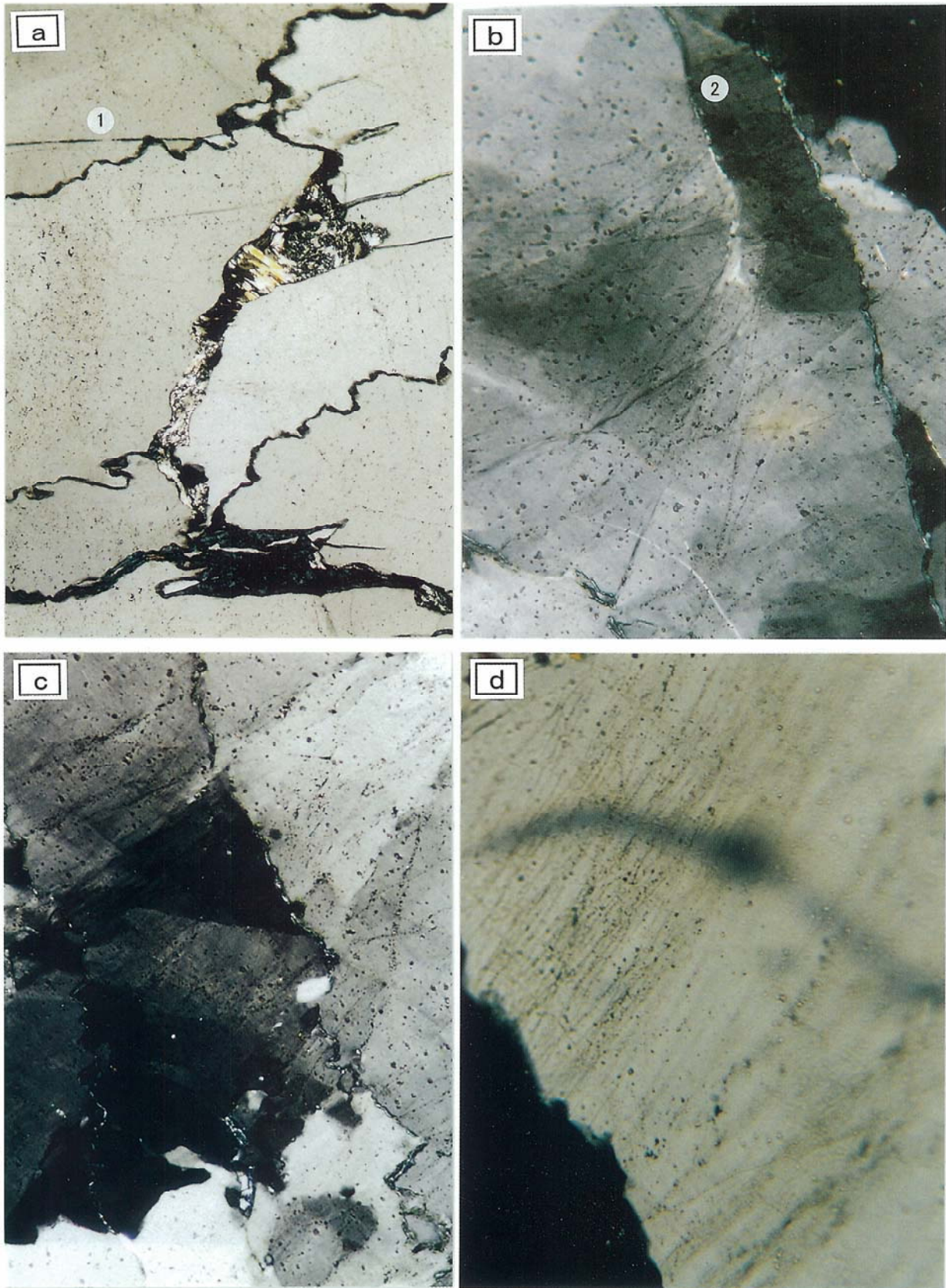
図版-9 1つの粒界横断C1の顕微鏡写真（ジプサム・プレート下（aとc）とクロス・ニコル下（bとd）で撮影）。aとb：C1の形態は、図版の右側の石英粒内では斜方対称、左側の石英粒内では単斜対称を示す（50倍観察）。cとd：図版-9 a(b)の右側の石英粒内のC1の拡大写真（200倍観察）。C1が白色葉片状鉱物脈であり単斜対称を示すことが明瞭。

Plate-9 Micrographs showing a C1 crack of intercrystalline type under gypsum plate (a and c) and crossed nicols (b and d). a and b: Shapes of C1 crack in quartz grain of the right side of Plate are orthorhombic crinkle and those in quartz grain of the left side are monoclinic crinkle. c and d: enlarged micrographs for C1 crack in quartz grain of the left side, clearly showing that the crack is a white flaky mineral-filled vein and its shapes are monoclinic crinkle.



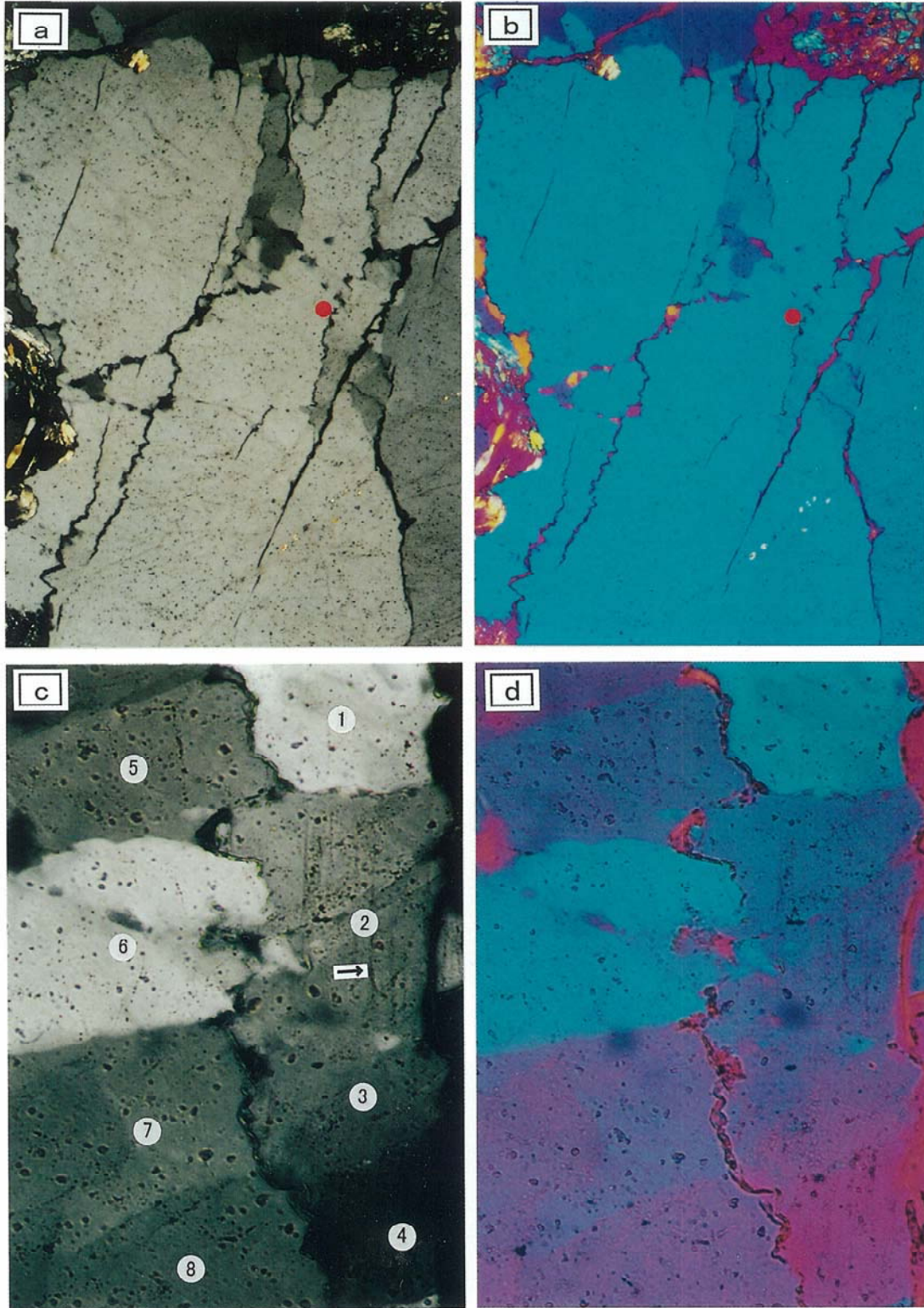
図版-10 C2と多様な形態を示すC1の顕微鏡写真(クロス・ニコル下(aとc)とジプサム・プレート下(bとd)で撮影)(200倍観察)。a(b): 翼間角の小さなクリンクル, c(d): 図版の左側のC1は、互いに軸面が平行な2つのオーダーのクリンクルを示す。より詳細な説明は本文中。

Plate-10 Micrographs showing C1 cracks with various shapes and C2 cracks under crossed nicols (a and c) and gypsum plate (b and d). a(b): crinkle with small interlimb angles, c(d): C1 crack of the left side of Plate shows crinkles of two orders, whose axial planes are parallel to each other. For fuller explanation see the text.



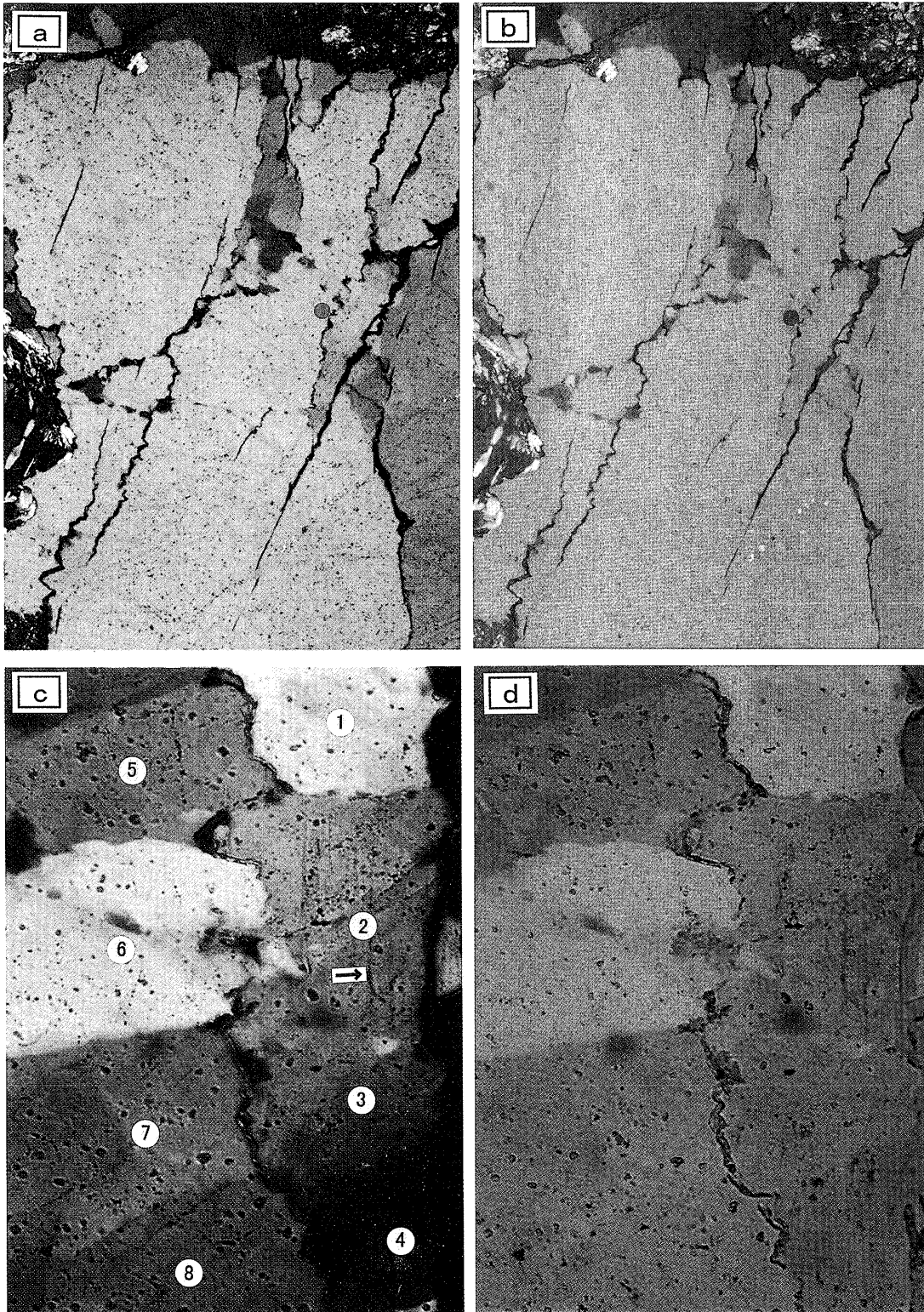
図版-11 a : C1とC2の関係を示す顕微鏡写真 (200倍観察)。点1においてC2はC1を切断しているようにも見える。b, c, d : C3クラックを示す顕微鏡写真。図版-11bの点2のC1の延長線上に狭いキンク帯が観察される。  
 Plate-11 a : Micrograph showing relationship between C1 cracks and C2 cracks. In the point 1, C1 crack may be cut across by C2 crack. b, c and d : micrographs showing C3 cracks. In the point 3 of Plate-11b a narrow kink band is observed on the extension line of C1 crack.





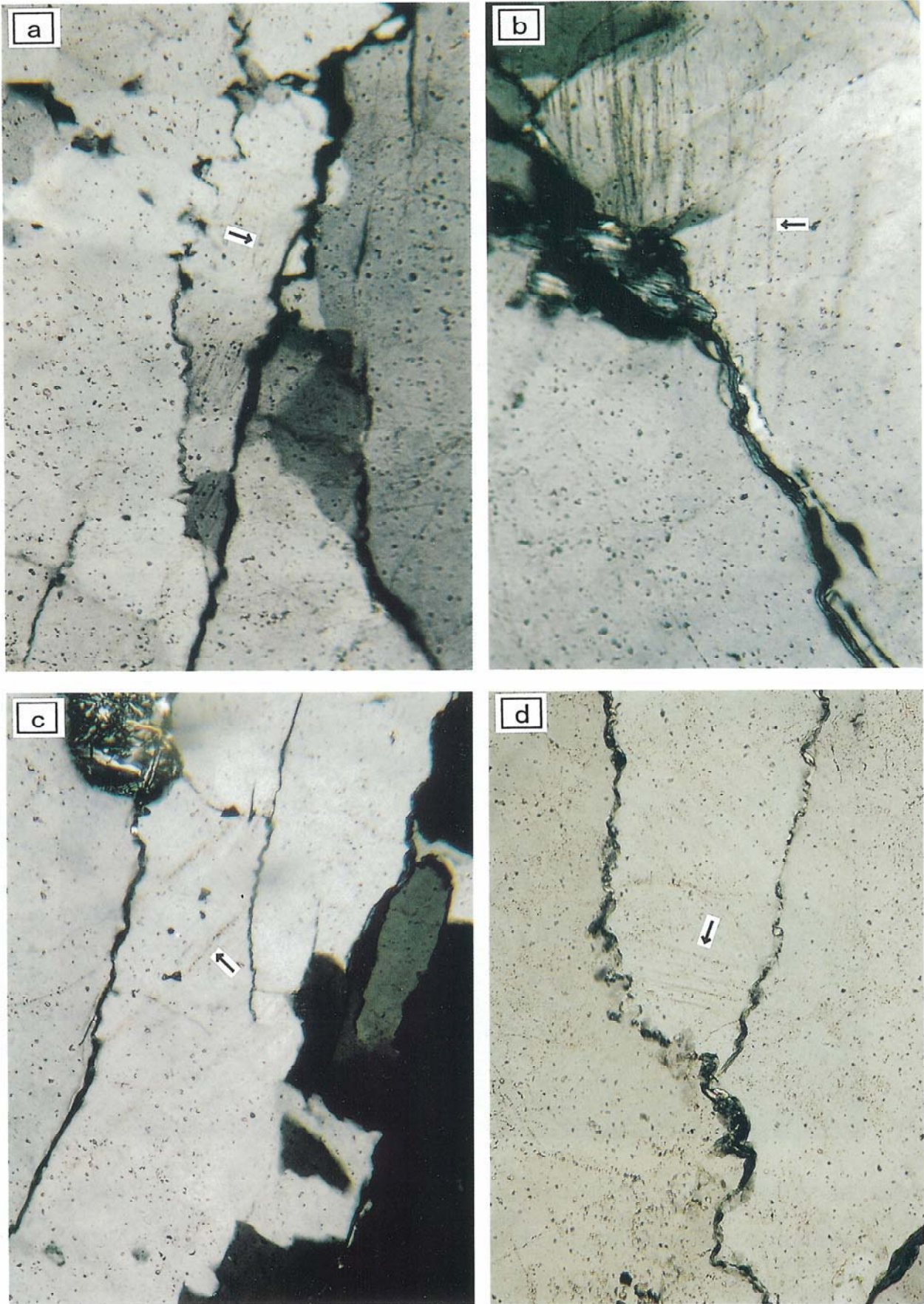
図版-12 石英の波動消光と動的再結晶作用を伴うC1クラックの顕微鏡写真(クロスニコル下(aとc)とジプサム・プレート下(bとd)で撮影)(aとb:50倍観察,cとd:200倍観察)。c(d):図版-12a(b)の赤点付近の拡大写真。C1に沿った動的再結晶石英粒を示す。C1は動的再結晶石英の粒界に沿ってクリンクル形態を示す。1~8:石英のc軸の測定点。矢印:石英の変形ラメラ。

Plate-12 Micrographs showing undulose extinction and dynamic recrystallization of quartz along C1 cracks under crossed nicols (a and c) and gypsum plate (b and d). c(d): enlarged micrographs around the red point of Plate-12a(b), showing that crinkle shapes of C1 crack are traced along grain boundaries of dynamically recrystallized quartz. In points 1~8 have been measured c-axes of dynamically recrystallized quartz grains. Arrow: deformation lamellae in quartz.



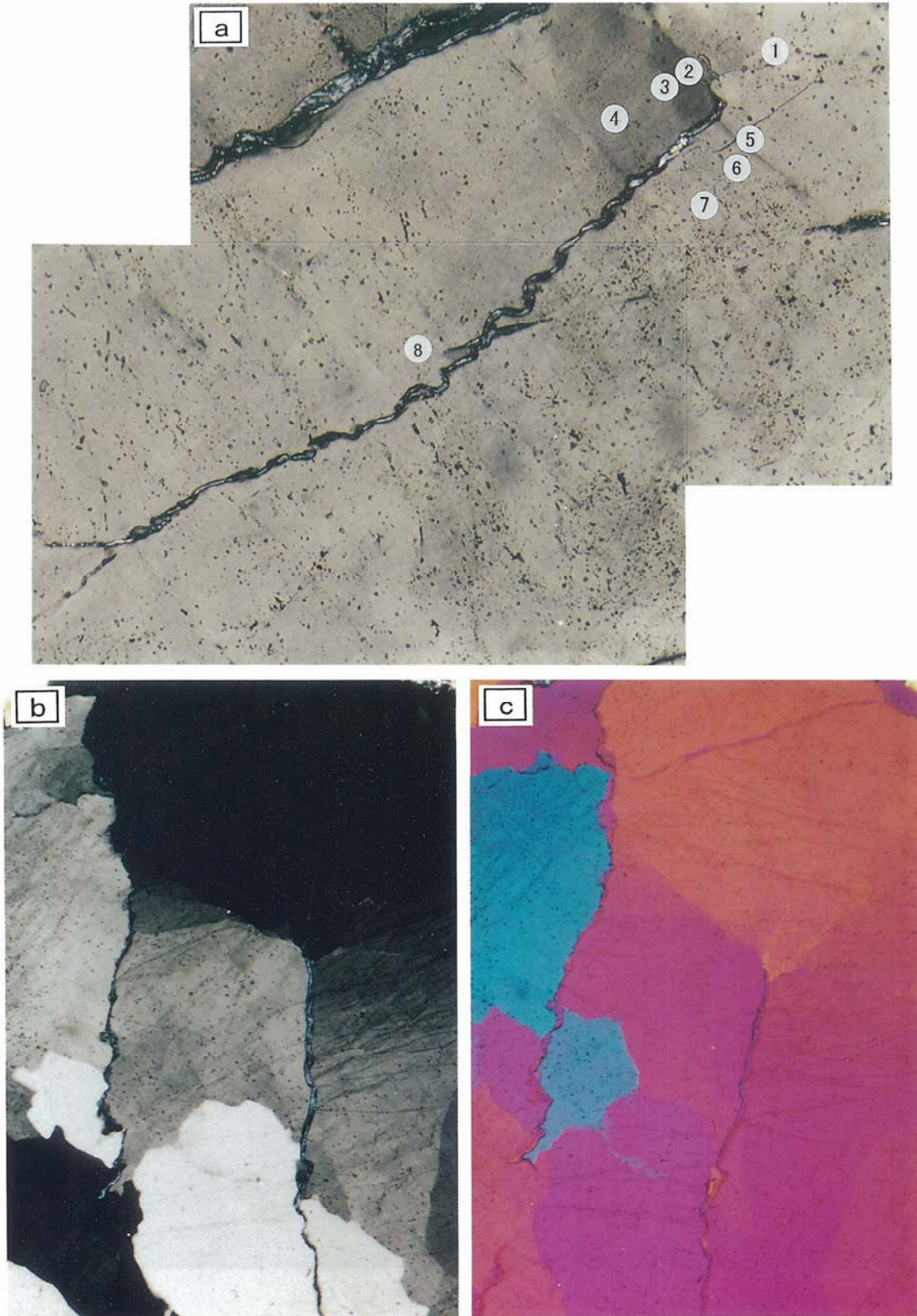
図版-12 石英の波動消光と動的再結晶作用を伴うC1クラックの顕微鏡写真（クロスニコル下（aとc）とジプサム・プレート下（bとd）で撮影）（aとb：50倍観察，cとd：200倍観察）。c(d)：図版-12a(b)の赤点付近の拡大写真。C1に沿った動的再結晶石英粒を示す。C1は動的再結晶石英の粒界に沿ってクリンクル形態を示す。1～8：石英のc軸の測定点。矢印：石英の変形ラメラ。

Plate-12 Micrographs showing undulose extinction and dynamic recrystallization of quartz along C1 cracks under crossed nicols (a and c) and gypsum plate (b and d). c(d): enlarged micrographs around the red point of Plate-12a(b), showing that crinkle shapes of C1 crack are traced along grain boundaries of dynamically recrystallized quartz. In points 1~8 have been measured c-axes of dynamically recrystallized quartz grains. Arrow: deformation lamellae in quartz.



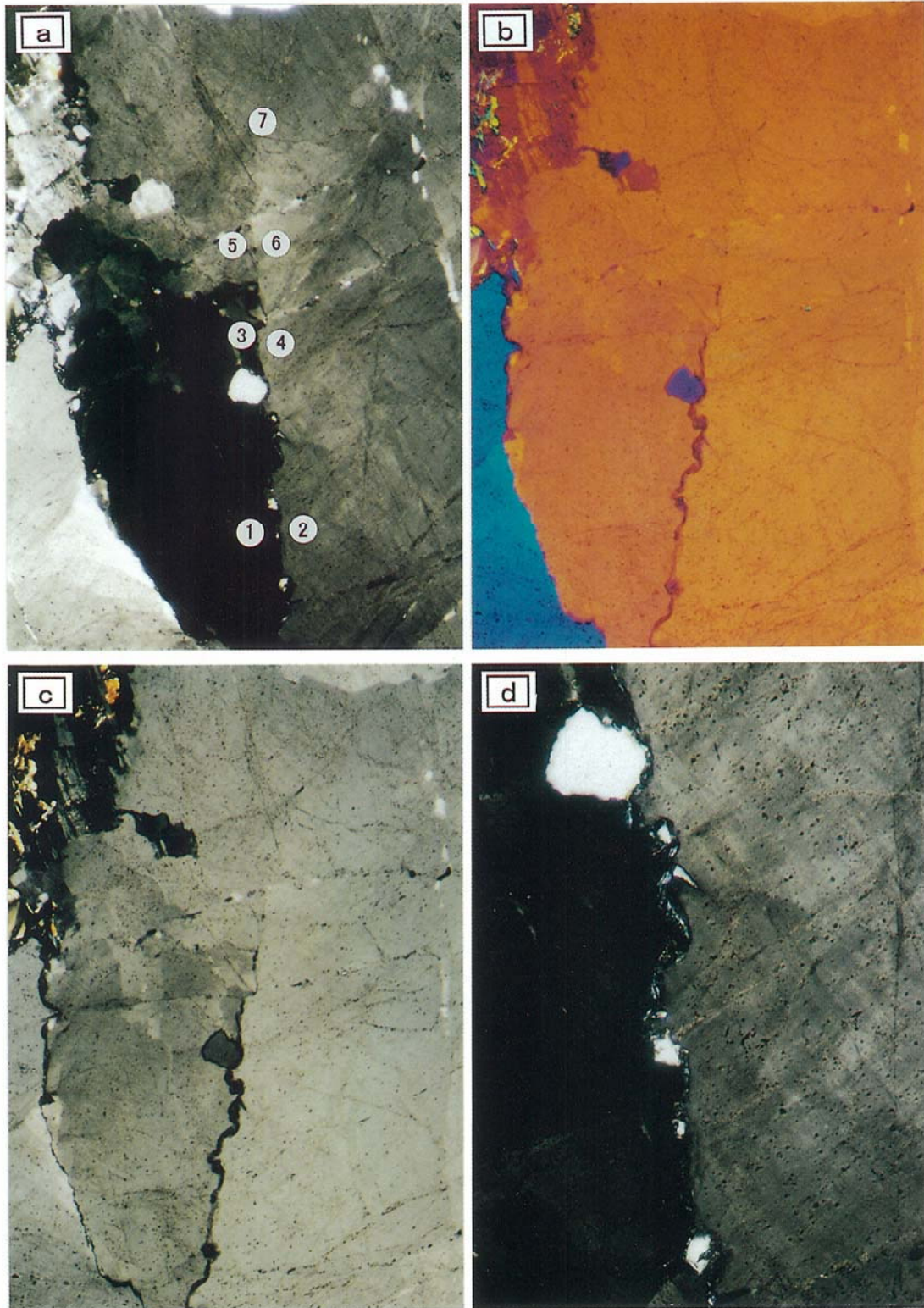
図版-13 C1クラックと石英の変形ラメラの顕微鏡写真（100倍観察）。矢印：変形ラメラ。

Plate-13 Micrographs showing C1 cracks and deformation lamellae in quartz. Arrows: deformation lamellae.



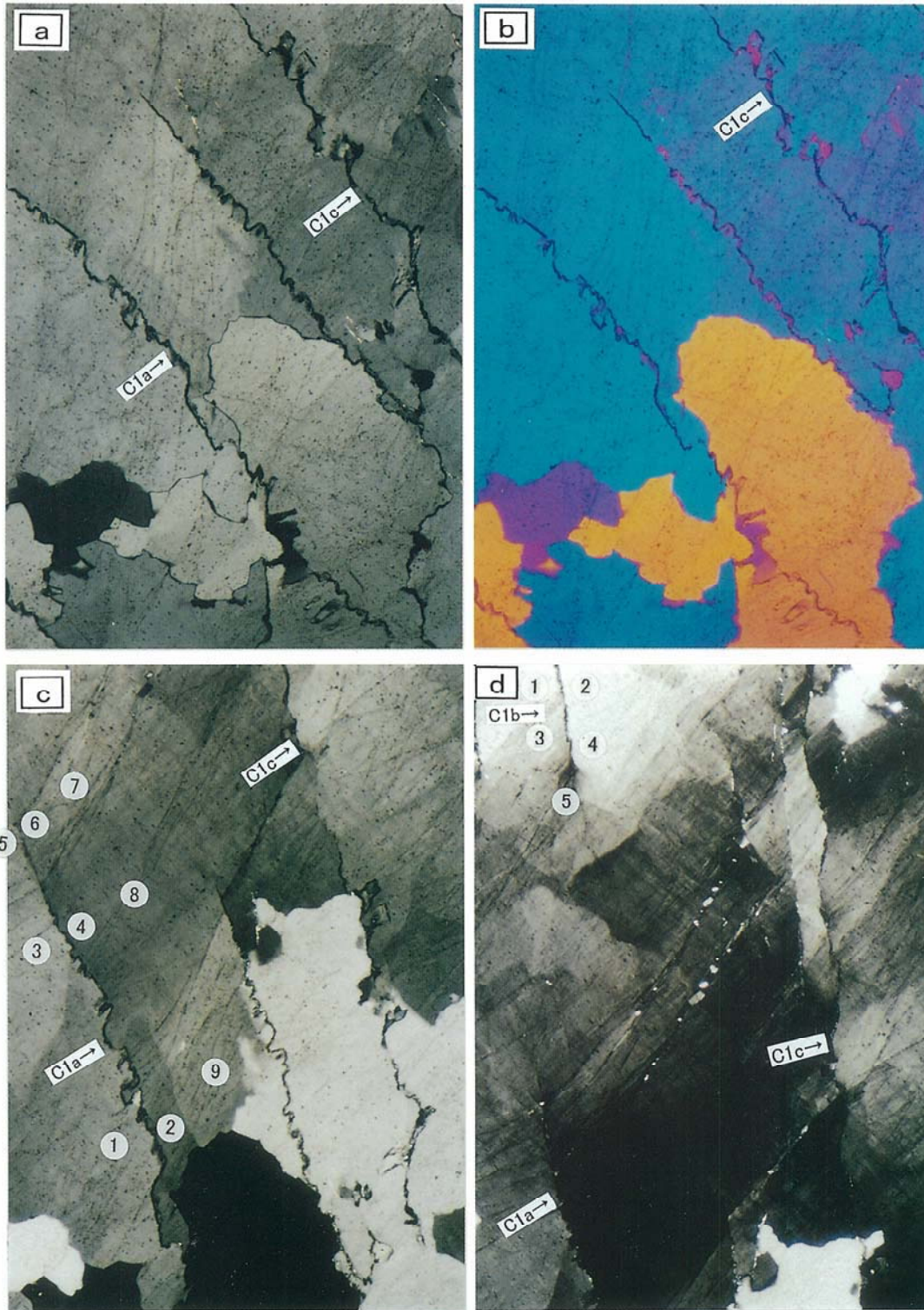
図版-14 a: C1に沿った石英の微細組織を示す顕微鏡写真(200倍観察)。点1~点7: C1の末端の石英のc軸ファブリックが解析された位置。点8: 引張クラック。bとc: C1の末端における石英の波動消光の1つのパターンを示す顕微鏡写真(クロス・ニコル下(b)とジプサム・プレート下(c)で撮影)(50倍観察)。

Plate-14 a: Micrograph showing microtexture of quartz along C1 crack. Points 1~7: positions where the c-axis fabric of quartz around the tip of C1 crack has been analyzed. point 8: extensional crack. b and c: micrographs showing a pattern of undulose extinction of quartz around the tip of C1 crack under crossed nicols (b) and gypsum plate (c).



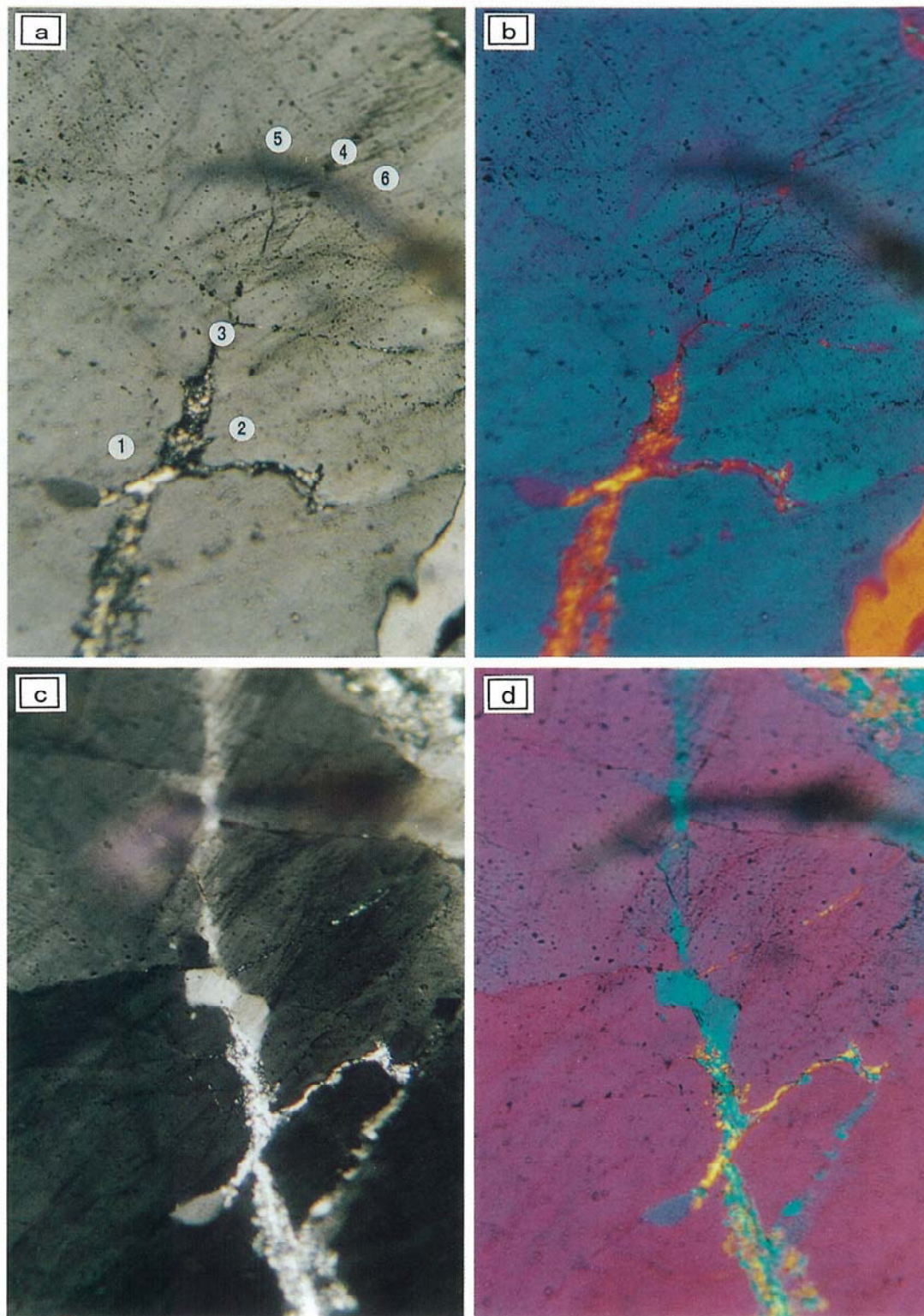
図版-15 C1クラックの末端付近における石英の微細組織を示す顕微鏡写真（クロスニコル下 (a, c, d) とジプサム・プレート下 (b) で撮影) (a, b, c: 50倍観察, d: 200倍観察)。石英の微細組織を読み取るために図版-15aと15cの間で消光位が異なっている。点1～点7: C1の末端の付近の石英のc軸ファブリックが解析された位置。d: 図版-15aの点1～点4の付近の拡大写真。C1クラックに沿って微細な動的再結晶石英粒（図版中の白色粒）が認められる。

Plate-15 Micrographs showing microtextures of quartz around a tip of C1 crack under crossed nicols (a, c and d) and gypsum plate (b). The difference in extinction position between Plate-15a and Plate-15c is for reading detailed microtextures of quartz around the C1 crack. Points 1~7: positions where the c-axis fabric of quartz around the tip of C1 crack has been analyzed. d: enlarged micrograph around points 1~4 in Plate-15a, showing minute grains of dynamically recrystallized quartz (white grains in Plate).



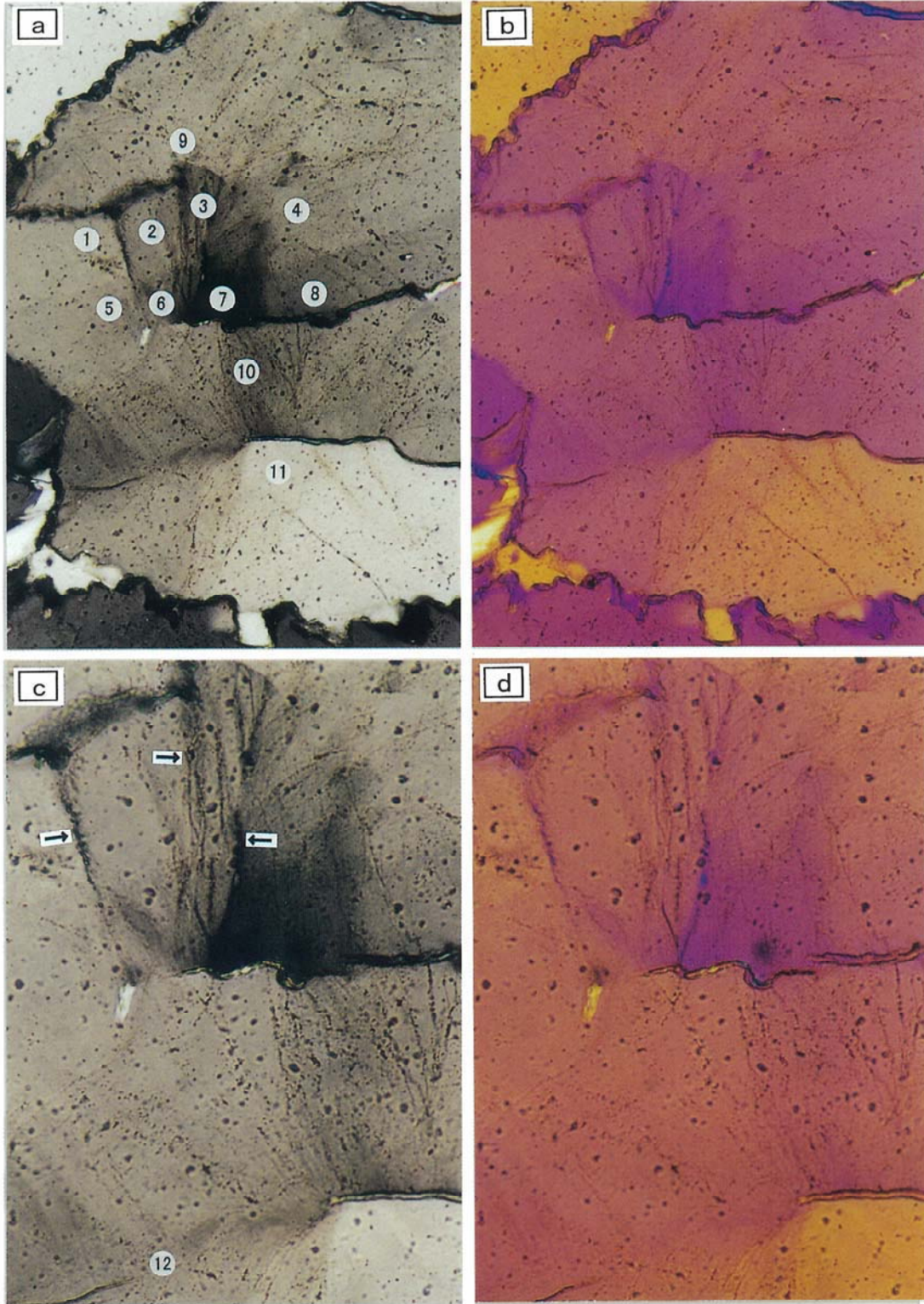
図版-16 平行なC1クラックのまわりの石英の微細組織を示す顕微鏡写真(クロスニコル下(a, c, d)とジプサム・プレート下(b)で撮影)(aとb: 50倍観察, cとd: 100倍観察)。石英の微細組織を読み取るために図版-15a, 15c, 15dの間で消光位が異なっている。図版-16c中の点1~点9: C1クラック(C1a)のまわりの石英のc軸ファブリックが解析された位置。図版-16d中の点1~点5: C1クラック(C1b)のまわりの石英のc軸ファブリックが解析された位置。説明の詳細は本文。

Plate-16 Micrographs showing microtextures of quartz around parallel C1 cracks under crossed nicols (a, c and d) and gypsum plate (b). The difference in extinction position among Plate-15a, Plate-15c and Plate-15d is for reading detailed microtextures of quartz around the C1 cracks. Points 1~9 in Plate-16c: positions where the c-axis fabric of quartz around the C1a crack has been analyzed. Points 1~5 in Plate-16d: positions where the c-axis fabric of quartz around the C1b crack has been analyzed. For fuller explanation see the text.



図版-17 C1クラックの末端付近における石英の微細組織を示す顕微鏡写真（クロスニコル下 (a, c) とジブサム・プレート下 (b, d) で撮影）(100倍観察)。石英の微細組織を読み取るために図版-17a(b)と17c(d)の間で消光位が異なっている。点1～点6：C1の末端の付近の石英のc軸ファブリックが解析された位置。C1の末端の延長線上にキンク帯（点3～点4を含む帯）が発達する。

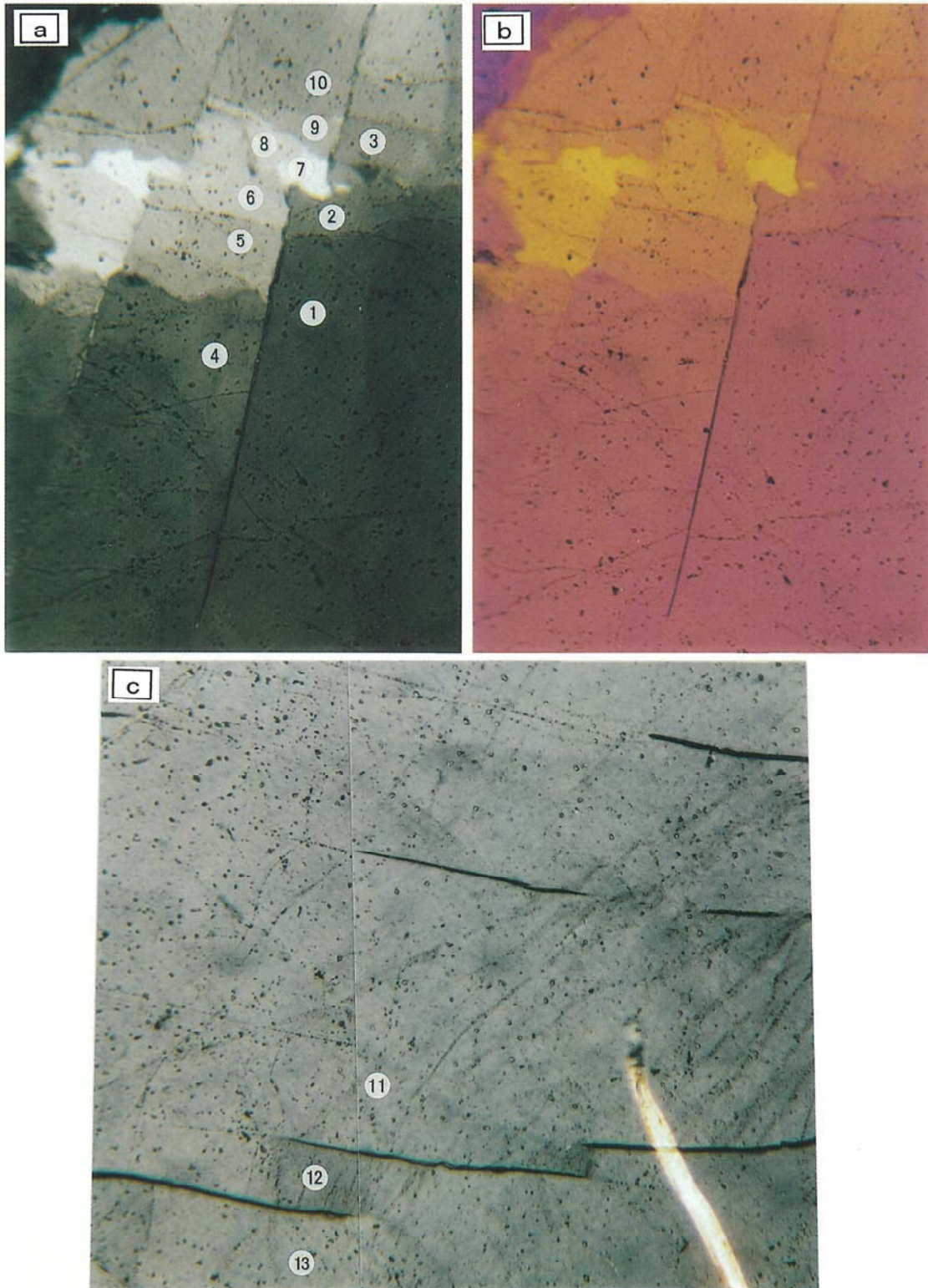
Plate-17 Micrographs showing microtextures of quartz around C1 crack under crossed nicols (a and d) and gypsum plate (b and d). The difference in extinction position between Plate-17a(b) and Plate-17c(d) is for reading detailed microtextures of quartz around the C1 crack. Points 1~6: positions where the c-axis fabric of quartz around the C1 crack has been analyzed. A kink band (= zone containing point 3 and point 4 in Plate-17a) occurs on the extension line of the tip of C1 crack.



図版-18 C1クラックの引張ステップ付近における石英の微細組織を示す顕微鏡写真(クロス・ニコル下(a, c)とジプサム・プレート下(b, d)で撮影)(aとb: 100倍観察, cとd: 200倍観察)。点1~点11: ステップ付近の石英のc軸ファブリックが解析された位置。c(d): 図版-18a(b)のステップ付近の拡大写真。矢印: C3クラック。点12: C1の末端の延長線上のキンク帯。説明の詳細は本文。

Plate-18 Micrographs showing microtextures of quartz around extensional step of C1 cracks under crossed nicols (a and d) and gypsum plate (b and d). points 1~11: positions where the c-axis fabric of quartz around the extensional step of C1 cracks has been analyzed. c(d): enlarged micrographs around the extensional step of Plate-18a(b). Arrows: C3 cracks. point 12: micrograph for a kink band on the extension line of the tip of C1 crack. For fuller explanation see the text.





図版-19 C2クラックの引張ステップ付近における石英の微細組織を示す顕微鏡写真（クロス・ニコル下（a, c）とジプサム・プレート下（b）で撮影）（aとb：100倍観察，c：200倍観察）。点1～点10：図版-19a(b)のC2クラックの引張ステップ付近の石英のc軸ファブリックが解析された位置。点11～点13：図版-19cのC2クラックの引張ステップ付近の石英のc軸ファブリックが解析された位置。説明の詳細は本文。

Plate-19 Micrographs showing microtextures of quartz around extensional steps of C2 cracks under crossed nicols (a and c) and gypsum plate (b). points 1~10: positions where the c-axis fabric of quartz around the extensional step of C2 cracks in Plate-19a(b) has been analyzed. points 11~13: positions where the c-axis fabric of quartz around the extensional step of C2 cracks in Plate-19c has been analyzed. For fuller explanation see the text.