

飛騨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 —

阿部康則・安江勝夫・原 郁夫

Analysis of geological profile along the Hida Tunnel, Central Japan (2)
 — Anisotropy of unconfined compressive strength
 of cataclastically deformed gneisses and gneissose granites —

Yasunori Abe, Katsuo Yasue and Ikuo Hara

Abstract

The Hida metamorphic rocks and Funatsu granite are main geological constituents around the southeastern half of the Hida Tunnel, central Japan. The former are hornblende gneiss and biotite gneiss with distinct gneissosity, and the latter is gneissose biotite granite containing pegmatite lenses, which are only weakly gneissose. Those rocks are commonly cataclastically deformed in various magnitudes, forming preferably oriented cataclastic zones (CZ) in minute scales. The gneisses, granite and pegmatite with CZ along and oblique to their gneissosity were experimentally deformed under unconfined compressive condition. The specimens are from cores of a boring (Bヨ-1 boring) drilled to clarify geological structure around the Hida Tunnel.

The results of experimental deformation of highly cataclastically deformed gneisses and granite indicate that their CZ is an anisotropy of formal fabric as a distinct plane of weakness. For most of experimentally deformed specimens, the preferred orientation direction of CZ is parallel to their gneissosity. Anisotropic strength behavior and deformation styles of the gneisses, granite and pegmatite have been investigated varying orientation angle (β) of their CZ under unconfined compressive condition.

The variation of their uniaxial compressive strength (σ) with β for specimens from highly cataclastically deformed gneisses and granite does not show U-shape but a clear tendency for σ to increase with increase of β , showing minimum value in $\beta=0$. Deformation fabrics produced by uniaxial compressive strength tests are cracks of various types. In specimens with $0^\circ < \beta < 25^\circ$ from highly cataclastically deformed gneisses and granite, many cracks, which are not sharp and straight, are produced along CZ, in those with $26^\circ < \beta < 50^\circ$ strong shear cracks are always produced along CZ, accompanying formation of tensile axial cracks, and in those with $51^\circ < \beta < 90^\circ$ tensile axial cracks, which are sharp and straight, are mainly produced oblique at high angles to CZ. σ appears to drastically change around $\beta = \text{ca.} 50$, where deformation style changes from shear cracks to tensile cracks.

Deformation styles experimentally produced in specimens with $26^\circ < \beta < 50^\circ$ from weakly cataclastically deformed gneisses, granite and pegmatite change from formation of shear cracks along CZ, through formation of shear cracks along CZ and tensile axial cracks, to formation of sharp tensile axial cracks with tiny shear cracks along CZ with increase of β .

(要 旨)

飛騨トンネルに沿った主要構成岩類は、飛騨変成岩と船津花崗岩である。変成岩は主として顕著な片麻構造をもつ角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩からなり、船津花崗岩は顕著な片麻構造をもつ黒雲母花崗岩が主岩相であるが弱い片麻構造をもつペグマタイトも認められる。これらの岩類は、多様な程度でカタクレーサイト化を受け、定向配列を示す微小なカタクレーサイト帯 (CZ) をもつものである。ここでは、片麻構造に沿ったCZが形成されるようにカタクレーサイト化を受けている試料と、片麻構造に斜交するCZが形成されるようにカタクレーサイト化を受けている試料に区分して、片麻岩・花崗岩・ペグマタイトの一軸圧縮強度異方性の検討を行なった。試料は飛騨トンネルに沿った地質構造を明らかにするために掘削されたボーリング (Bヨ-1 ボーリング) のコアから採集された。

強くカタクレーサイト化した片麻岩・花崗岩についての一軸圧縮試験によれば、CZが岩石に形状的構造の異方性を

付与する1つの顕著な弱面である。ほとんどの一軸圧縮試験試料においてCZの優位配列の方向と片麻構造は平行である。この片麻岩・花崗岩・ペグマタイトの一軸圧縮試験においては、CZの圧縮応力の作用方向に対する配列方位 (β) との関係を検討して、強度特性と変形様式を検討した。

強くカタクレーサイト化した片麻岩・花崗岩についての一軸圧縮試験の結果では、一軸圧縮強度 (σ) - β 関係は、U形を示さず、 $\beta=0$ で最低値をもち、 β の増加とともに σ が増加する1つの明瞭な傾向を示した。破壊の様式は多様な特徴を示すクラックで、 β の増加とともに変化した： $0^\circ < \beta < 25^\circ$ の試料では、シャープでも直線的でもない性状の多くのクラックがCZに沿って形成された。 $26^\circ < \beta < 50^\circ$ の試料では、アキシャルクラックの形成を伴いながら、CZに沿った強いシアクラックが形成された。 $51^\circ < \beta < 90^\circ$ の試料では、CZに高角度で斜交するシャープで直線的なアキシャルクラックが形成された。

カタクレーサイト化が極めて弱い片麻岩・花崗岩・ペグマタイトで $26^\circ < \beta < 50^\circ$ の試料についての一軸圧縮試験の結果では、変形様式は β の増加とともに、CZに沿ったシアクラックの形成 → CZに沿ったシアクラックとアキシャルクラックの形成 → シャープなアキシャルクラックと微弱なシアクラックの形成へと変化する。

キーワード：カタクレーサイト、一軸圧縮強度、異方性、変形様式、クラック

1. 緒言

飛驒トンネルを構成する地質体は、北西半部が濃飛流紋岩、南東半部が飛驒変成岩花崗岩コンプレックス・手取層群である(野沢ほか, 1975¹⁾; 磯見・野沢, 1957²⁾ 参照)。応用地質株式会社は、飛驒変成岩花崗岩コンプレックス・手取層群が分布する南東半部の地質断面解析を担当した(阿部ほか, 2002³⁾)。

阿部ほか(2002³⁾)による調査によって、次のような諸点が明らかにされた：(1)本地域の飛驒トンネル縦断面を構成する主要な地質体は、飛驒変成岩・船津花崗岩・手取層群であり、(2)これら岩類の地質構造-岩石構造の解析から、変成岩花崗岩は手取層群の上に衝上するナップを形成する、(3)トンネル施工基面は最下位のナップ内にあり変成岩と船津花崗岩で構成されている(阿部ほか, 2002³⁾, 図-3)、(4)変成岩と船津花崗岩は1つの片麻状構造をもつ片状岩である、(5)ナップ群の衝上運動において岩石は強く破碎を受けカタクレーサイト化している(阿部ほか, 2002³⁾, 図-6, 図-7a)、(6)カタクレーサイト化に伴って石英、緑簾石、ぶどう石、緑泥石、白雲母、方解石などが形成され片状となっている、(7)トンネル施工基面の変成岩と船津花崗岩は、ナップ形成に際して、軸面が中~高角度配置で、軸がトンネル・ルートに低角度配置の褶曲作用を受けており、このため片麻状構造とカタクレーサイトの片状構造は、トンネル・ルートに低角度のトレンドをもって配置している(阿部ほか, 2002³⁾, 図-4c, 図-5d)、(8)第三紀の含金石英脈鉱床が発達し、トンネル施工基面を構成する変成岩と船津花崗岩の一部は、この鉱化作用の過程に、石英、緑簾石、カーボネイトなどを主体とする岩相に変化している(阿部ほか, 2002³⁾, 図-6, 図-7b)、(9)未固結ガウジを伴う多数の鉛直あるいはそれに近い高角度配置の断層が、3つの集中域において網の目状に発達する(阿部ほか, 2002³⁾, 図-7c)、(10)断層の多くはトンネル・ルートに低角度配置である(阿部ほか, 2002³⁾, 図-9)、(11)断

層は粘土に富む主変位帯(=水の通過を遮断する帯)とより幅広く発達する主として破碎岩片からなる非~弱変位帯(=水の通過しやすい帯)で構成されている。

本稿では、上記のような形状的構造をもつ飛驒変成岩・船津花崗岩で構成される飛驒トンネル施工基面の地山強度の推定に資するため、ボーリング・コア(Bヨ-1ボーリング; 阿部ほか, 2002³⁾)のインタクトな岩石(飛驒変成岩・船津花崗岩)の一軸圧縮強度について検討した結果について報告する。

このような検討では、まず、飛驒変成岩・船津花崗岩が片麻構造をもつ片状岩であることに留意すべきであろう。また、カタクレーサイト化によるクラック密度の増加、細粒化、葉片状鉱物を含む低温鉱物への変化と片状構造の形成が、飛驒変成岩・船津花崗岩の力学強度にどのような変化をもたらすかの検討を課題にすべきであろう。鉱化作用の過程における、石英、緑簾石、カーボネイトなどを主体とする岩相への変化やこれらの低温鉱物からなる細脈の形成がもたらす効果にもまた留意しなければならないことであろう。断層運動による岩石の変形は、高い密度のマикроクラックの形成を伴うものであることは良く知られていることである。このため、未固結ガウジを伴う断層周辺に分布する肉眼ではインタクトに見える岩石にも留意が必要であろう。しかし、この報告ではまず、飛驒変成岩・船津花崗岩のもつ片麻構造とカタクレーサイト化が付加した形状的構造の異方性をもたらす力学強度特性への影響を中心におき検討した結果について述べることにしたい。

形状的構造について異方性をもつ岩石の一軸圧縮強度特性については、これまでに多くの研究がなされてきている。Al-Harhi (1998⁴⁾)によるまとめを引用すると、「The concept of strength anisotropy in rocks, due to the effect of single plane of weakness, was originally developed by Jager (1960⁵⁾) who suggested the U-type relationship. Further investigations were conducted on the strength behavior of shale and

slates by Hoek (1964⁶¹), Donath (1964⁷¹), Chenevert and Gatlin (1965⁸¹), McLamore and Gray (1967⁹¹), Hoek (1968¹⁰¹), Attewell and Sanford (1974¹¹¹) and Brown et al.(1977¹²¹). The anisotropic behavior of gneiss and schist was investigated by Deklotz et al. (1966¹³¹) and by McCabe and Koener (1975¹⁴¹). The strength anisotropy of phyllite was studied by Singh et al. (1989¹⁵¹) and Ramamurthy et al. (1993¹⁶¹). Sandstones were investigated by Horino and Ellickson (1970¹⁷¹) and Aora (1987¹⁸¹). Other rock types such as coal was studied by Pomeroy et al. (1971¹⁹¹), and diatomite was investigated by Alliro and Boehler (1979²⁰¹). The strength anisotropy of marble was investigated by Badiuzaman and Shehata (1993²¹¹), Sonobul et al. (1993²²¹), Al-Lehyani et al. (1996²³¹) and Al-Harathi et al. (1996²⁴¹).」.その他にも, Hoek & Brown (1982²⁵¹) による理論的研究, Akai (1971²⁶¹), Behrestaghi et al.(1996²⁷¹) などによる結晶片岩類についての強度異方性の研究がある。これらの研究は, 強度異方性について, ほぼ同じような特徴があることを明らかにしてきた。即ち, 岩石のもつ形状的異方性を形成する1つの面構造の方向と圧縮応力の作用方向のなす角 (β : orientation angle) との関係で見ると, 「the failure strength is high at $\beta = 0^\circ$ or 90° and is minimum when β varies from 20 to 40° 」(Behrestaghi et al., 1996²⁷¹)。そして, Al-Harathi (1998⁴¹) は, 形状的構造の性状と典型的な強度分布パターンを, 図-1のように, 3つのCaseとしてまとめている: 異方性を示す形状的構造が単一の節理面や層理

面である時 Case I, 異方性を示す形状的構造が葉理, 片理, へき開などの浸透的構造 (penetrative structure) である時 Case II, 異方性を示す形状的構造が 90° で交差する時 Case III。本報告が扱う試料は, Case IIに属する構造特性を示すものである。

スレート, フィライト, 結晶片岩, 片麻岩などとカタクレーサイトは形成のプロセスが全く異なっている。前4者が応力場での鉱物の塑性変形と結晶作用・再結晶作用によって大きな圧縮歪みを通して形成される岩石であるのに対して, 後者は, 固結のプロセスを含むとしても, 主として岩石を構成する鉱物の破砕を通して形成される岩石である。このような形成のプロセスの相違は, 強度特性に反映される可能性がある。片麻構造をもつ岩石の一軸圧縮強度異方性の特徴は, 上記のように, これまでの研究で明らかにされているが, カタクレーサイト化した岩石についての一軸圧縮強度特性の既往の研究はない。このため, カタクレーサイト化による変化を示す本地域の変成岩・花崗岩は, 第1図のCase IIとは異なる一軸圧縮強度特性を示す可能性があり, 詳細な解析が必要であると考へ検討を行なった。

このような検討結果を応用地質技術年報において紹介することをお許し下さった日本道路公団に感謝申し上げます。ただし, この報告は, あくまでも私たちの見解を述べたものである。また, 応用地質株式会社の大塚康範博士と水野敏実氏からは, この論文の原稿を読み有益な助言と励ましを頂いた。滝口志郎氏と岡野肇氏からは, 原稿・図・表の作成において多くの援助を頂いた。これらの方々記して感謝の意を表する次第である。

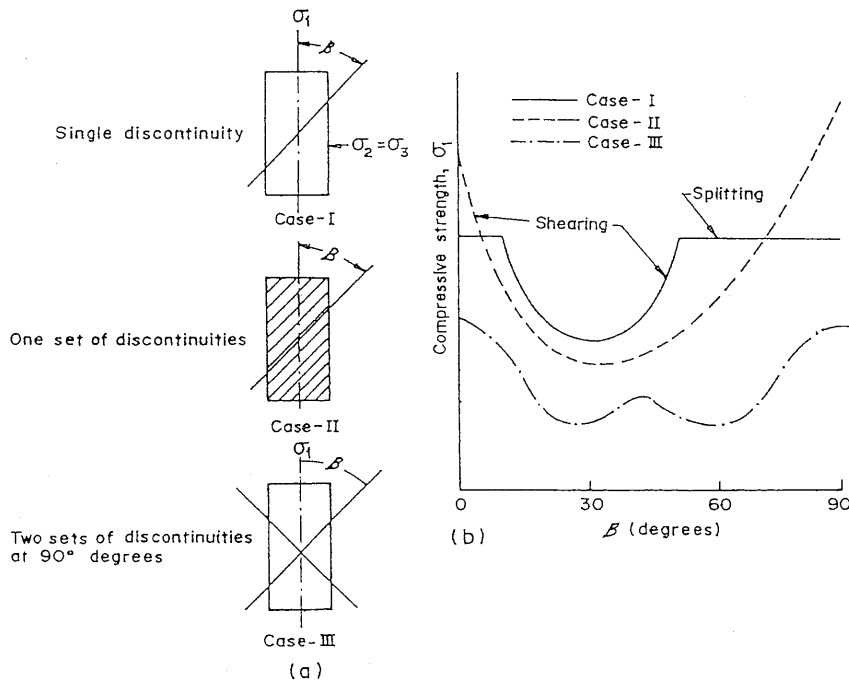


図-1 典型的な強度異方性カーブ (Al-Harathi, 1998による)
Fig.1 Typical strength anisotropy curves (after Al-Harathi, 1998)

2. 船津花崗岩と飛騨変成岩のカタクレーサイト構造

本地域の地表踏査で観察された花崗岩類の主要な岩相は、花崗岩、ペグマタイトである。変成岩としては角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩、珪長質片麻岩、石灰質片麻岩である。一軸圧縮強度を検討するためのこれら岩類についての試料は、Bヨ-1ボーリング（阿部ほか、2002³¹）のコアから採集した。このため、このボーリングでは出現しない珪長質片麻岩、石灰質片麻岩の一軸圧縮強度は検討していない。地質構造解析の結果では、トンネル施工基面を構成する変成岩として、珪長質片麻岩、石灰質片麻岩が出現する可能性は極めて小さい。

本地域の花崗岩、ペグマタイト、角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩は、片麻構造を形成する変形作用（マイクロサイト化）とカタクレサイト化を受けている（阿部ほか、2002³¹）。本地域の花崗岩、ペグマタイト、角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩に見られるカタクレサイト化の程度は一様ではない。例えば、図-2の上段の花崗岩試料では、片麻構造は顕著であり、カタクレサイト化による改変は極めて弱い。それに対して、下段の花崗岩試料では、片麻構造に沿って試料全体が強くカタクレサイト化しており、初生的片麻構造は大きく改変されている。図から、カタクレサイト化によって、新に1つの片状構造、即ち形状的構造の異方性、がもたらされていることが読み取れる。

カタクレサイト化が、本地域の花崗岩、ペグマタイト、角閃石片麻岩、黒雲母片麻岩にもたらした最も主要な変化は、原岩を構成する鉱物とその組織の破砕であるが、それに付随したより低温で安定な鉱物種の形成がある。多様な組織が形成されている。一軸圧縮試験に用いた試料の肉眼観察とともに、この試料に接したコア試料の顕微鏡観察によって、試験試料がもつカタクレサイト化組織の特徴を捉えることを試みた。各試料に関わる記載は後頁にゆずり、この項では、このようにして求められた試験試料に出現するであろう微細組織の特徴を、代表例を用いて簡潔に記載する。

図-3aは、花崗岩のカタクレーサイト化によって形成された微細でシャープな破砕帯が、片麻構造を高角度で横断する組織を示す顕微鏡写真である。図-3bが、この破砕帯の拡大写真である。破砕帯には破砕によって形成された微細鉱物粒が充填し、帯境界はシャープである。この破砕帯は斜長石とカリ長石を横断するものであるが、帯の両側の斜長石とカリ長石はそれぞれ対応する関係にあり、帯に沿った横ずれ変位は無視出来る程度のもと考えられる。しかし、この帯を充填する鉱物粒には母晶とは異なる石英の破砕片が多数認められる。したがって、この資料から、試験試料には、カタクレサイト化の過程にクラックの開口と破砕岩片の移動沈積が起こったことによって形成された微細構造をもつものがあると考えられる。ちなみに、図の試料に接した試料2では、図-3aから、片麻構造はコア軸に高角度であり、

このような微細破砕帯がコア軸に平行～低角度で多数発達しているものと推定される。試料2の一軸圧縮試験では、移動沈積した破砕岩片が充填した開口クラックのもつ力学強度が問題となるはずである。

図-4d, eは、同じような特徴を示す微細破砕帯が、ペグマタイト石英と長石を横断してシャープに発達することを示している。破砕帯は、ペグマタイトを構成する石英と長石の動的再結晶粒の形態定向配列による片麻構造に沿って発達している。図-4eは、石英を横断する破砕帯の拡大写真である。この破砕帯には、母晶石英に由来する長細い石英片とともに母晶とは異なる微細長石片がランダムに充填している。カタクレサイト化の過程には、クラックの開口と、そこへの破砕岩片の移動沈積が起こっているであろう。

図-3d図は、カタクレサイト化の過程に形成された微細な破砕帯が、狭いスペーシングで発達することを示している。この微細破砕帯では、帯境界はシャープではない。下位の石英を横断する破砕帯では、帯は、母晶とは僅かに格子方位を異にする石英片で構成されている。この帯の中の石英片の消光位はほぼ同じで、両側の母晶より少し暗い。このことは、この破砕帯の形成で、石英は、脆性的ではあるがキンキングのように変形したことを示している。

図-5aと図-6aでは、片麻構造に沿うように微細な破砕帯が網の目状に発達している。第5b~d図は、この破砕帯の拡大写真である。図は、この帯において、石英、長石に、雁行状の微細クラック群が形成されているものがあることを示している。この雁行状の微細クラック群は、破砕帯に沿った剪断変形を示唆する組織である。

図-6b, dは、図-5aと図-6aに見られる片麻構造に沿った微細な変形帯のいまひとつの型の拡大写真である。この帯は、原岩の黒雲母に富む層が、カタクレサイト化の過程に受けた顕著な組織変化を示すものである。黒雲母は緑泥石に変化し緑泥石に富む層となっている。石英の残存結晶は認められるが、長石は全体として白色雲母・ぶどう石へ変質している。帯に沿って緑泥石、石英、白色雲母・ぶどう石の形態定向配列が顕著である。

図-7cは、図-6b, dと同じ型の破砕帯であるが、長石の破砕変質は弱い。ここでは緑泥石化した黒雲母片にキンクの形成が顕著である。図-8aは、黒雲母の緑泥石化が進行した帯に沿って、低角度でシャープな切断面をもつ微小クラック群が発達する型である。クラックは長石も切断する。黒雲母の緑泥石化と石英の圧力溶解、波動消光だけが認められる帯もある（図-8b）。

本地域の岩石の力学強度特性の検討では、上記のような多様な性状の微細カタクレサイト帯が力学強度に与える影響について考慮することが必要となる。

微細カタクレサイト帯の岩石中における配列は、一般に分散を伴うが、定向性を示すものである（例、図-5a, 図-6a）。微細カタクレサイト帯の平均的なトレンド（＝卓越方向）は、片麻構造に沿うものが多いが、

明瞭に斜交するものがある(例, 図-3 a)。

有色鉱物のモード値はまた、力学強度特性に極めて重要な意味をもつ形状の構造要素であろう。有色鉱物のモード値は、花崗岩と変成岩の間で異なり、変成岩で大きい(図-2, 9, 10, 11)。しかし、花崗岩には変成岩に近いモード値を示すものがある。ペグマタイトは構成鉱物が粗粒であるだけでなく有色鉱物のモード値が低い(図-4)。

3. 一軸圧縮試験

ボーリング・コア($\phi 100\text{mm}$)から、コアピッカーにより $\phi 50\text{mm}$ のコアをくり貫き、コアカッターにより両端を切断し、両端面がコア軸に垂直で平滑となるように研磨し、 $\phi 50\text{mm}$, H 100mmの試験試料を作成した。

一軸圧縮試験は、50 tonfの载荷能力をもつ試験装置を使用し、0.1%/minの歪み速度で行なった。試験試料に破壊構造が現れ、応力-歪み曲線上でピーク(一軸圧縮強度)が読み取れた位置で試験を停止し、試料の表面に見られる破壊構造の保存を行なった。そして、次に述べるように、一軸圧縮強度、試料原岩の岩相、試料原岩の構造特性、破壊構造の相互関係の解析を行なった。大きな変形により破壊の比較的初期的な組織が消えて無くなる前の状態を記載検討したが、脆性破壊であり顕微鏡観察の薄片作成のための組織保存が困難で、1試料をのぞき試験試料の表面の肉眼観察のみによるものとなった。

4. 一軸圧縮強度と原岩の岩相および形状の構造との関係

先に述べたように、本報告の花崗岩類、変成岩試験試料には、片麻構造とともに微細カタクレサイト帯が発達し、形状の構造に関して異方性を示す岩石である。試験試料には、片麻構造とカタクレサイト帯が、平行なものと斜交しているものがある。斜交関係にある試験試料においては、後述のように、破壊組織は、片麻構造ではなく、カタクレサイト帯に支配されるようにして発達することが観察された。このため、試験試料が充分多いという条件にないこともあって、ここでは、力学強度と形状の構造の異方性との関係図は、コア軸(=圧縮応力の作用方向)とカタクレサイト帯のなす角をorientation angle (β)として作成された(図-12, 13, 14)。

4.1 一軸圧縮強度異方性

図-12は、花崗岩類と変成岩の破壊試験結果を一括して作成された一軸圧縮強度(σ)- β 図である。図から、分散は大きい、 σ は β の増加とともに増加する明瞭な傾向を示すと言うことが出来る。この σ - β 図上の資料分布はまた、単純に β の増加とともに σ が増加するという関係にはなく、 β が 20° 付近と 50° 付近で不連続的に増加することを示している。試験試料が充分多いという条件にはないのではあるが、図の示すこのような特徴の意

味は充分検討することが必要であろう。

そこで便宜的に、 σ - β 図上での資料分布域を、領域Ⅰ(β がほぼ $0^\circ \sim 20^\circ$ の領域)、領域Ⅱ(β がほぼ $21^\circ \sim 50^\circ$ の領域)、領域Ⅲ(β がほぼ $51^\circ \sim 90^\circ$ の領域)に区分することにする。花崗岩類と変成岩に分けて σ - β 図を作成したのが、図-13と図-14である。領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの区分は、一括図(図-12)におけるよりは、花崗岩類についての σ - β 図(図-14)においてより明瞭であるように見える。

花崗岩類の σ - β 図(図-14)の領域Ⅱでは、 σ の最高値も最低値もともに、 β の増加とともに明瞭に増加している。ほぼ同じ β に対して、 σ は著しく大きく変化しているにもかかわらず、最高値も最低値もともに同じようなパターンで、 β の増加とともに増加している。領域Ⅲでは、 σ の最高値は資料が1点であるため β の増加とともにどのように変化するかは明らかでないが、 σ の最低値は、資料は僅かだが、 β の増加とともに僅かながら増加する傾向があるように見える。 β に対する σ の増加率は、領域Ⅱよりはるかに小さくなっている。他方、領域Ⅰでは、最高値と最低値が、 β の変化とともにどのように変化するかは読み取れない。

変成岩の σ - β 図(図-13)には残念ながら領域Ⅰの情報は無い。領域Ⅱと領域Ⅲにおける σ の最低値の変化のパターンは、花崗岩類のそれと同じで、 β の増加に伴う σ の増加率は、領域Ⅱで明瞭で大きく、領域Ⅲで小さい。しかし、変成岩では σ の最高値は、領域Ⅱと領域Ⅲを通してほぼ一定であり、花崗岩類の σ の最高値の変化パターンとは大きく異なっている。

花崗岩類と変成岩の σ - β 図上に見られる上記のような特徴は、試験試料が充分多いという条件にないという点を考慮にいれながら検討することが必要であろう。では、次に、 σ - β 図が示唆する問題を、一軸圧縮試験試料の表面に見られる破壊構造の特徴と原岩試料のもつ構造の特徴との関係から検討しよう。個々の試料の σ - β 図上の位置については、表-1、図-13、図-14を参照されたい。

4.2 試験試料に見られる破壊構造と原岩の形状の構造との関係

4.2.1 変成岩

花崗岩類と変成岩の一軸圧縮試験試料の表面に、肉眼で観察される破壊構造は、クラックである。試験によって出現したクラックの多くは、圧縮軸(コア軸)に垂直な面では、1つの卓越する方向をもつように形成されている。このような卓越方向は、一般にカタクレサイト帯の卓越走向にほぼ平行である。このため、試験試料の表面に肉眼で観察される破壊構造は、カタクレサイト帯の卓越走向にほぼ平行な方向から見ることによって、その特徴を捉えることが可能である。図-15と図-17は、このような方向からの破壊構造のスケッチである。

まず、変成岩について、 σ - β 図(図-13)の領域Ⅱと領域Ⅲに見られる破壊組織を検討しよう。図-9は、領域Ⅱの6試料の破壊試験後の写真であり、図-15の中の6試料のスケッチと対応するものである。また、図-10a, b, cは、領域Ⅲの3試料の破壊試験後の写真であり、図-15のなかの3試料のスケッチに対応するものである。図-10fは、領域Ⅱの1試料の破壊試験後の写真であり、図-15の中の1試料のスケッチと対応するものである。まず、個々の試料に見られる破壊構造と原岩の形状的構造との関係について簡潔に記載する。

4.2.1.1 領域Ⅱの破壊構造

試料31(黒雲母片麻岩の薄層を挟む角閃石片麻岩)：試料の中央部に片麻構造に沿って3mm程度の厚さの黒雲母片麻岩が角閃石片麻岩に挟まれている。カタクレサイト化の過程に、この層に沿って、石英、斜長石の弱い破碎変質と黒雲母の緑泥石化、これらの鉱物片の顕著な形態定向配列によって規定される片理の形成が起こっている(図-16)。この層を取り巻く角閃石片麻岩には、カタクレサイト化による変形変質の痕跡はほとんど認められない。黒雲母片麻岩起源のカタクレサイト帯——以下ではCZと記す——がコア軸となす角(β)は約28°である。一軸圧縮試験によって形成された破壊構造は、このCZに沿った1つのシアクラックである(図-9a, 15-31, 16)。

試料32(黒雲母片麻岩)：1つのCZが片麻構造に沿って発達。一軸圧縮試験によって、このCZに沿ったシアクラックと1つのアキシャルクラック(コア軸に平行なクラック)が形成された。シアクラックに沿った滑りが、アキシャルクラックに開口をもたらしている(図-9b, 15-32)。

試料33(黒雲母片麻岩)：片麻構造と僅かに斜交するCZが発達する。試験試料に接した試料の薄片観察によれば、このCZに沿ってぶどう石を主体とした細脈の発達と黒雲母の緑泥石化、石英の圧力溶解、波動消光が認められる(図-9c, 8b)。しかし、このCZに沿って構成鉱物の破碎は認められない。一軸圧縮試験によって、1つの卓越したシアクラックがこのCZに沿って形成された。このシアクラックに伴って、微細なアキシャルクラックと片麻構造に沿った微細クラックが発達(図-9c, 15-33)。

表-1 試験試料の性状と試験結果

Table 1 Property of test specimen and test results

試験試料番号	深度(m)	岩種	カタクレサイト帯の傾斜角 β (°)	一軸圧縮強度MN/m ²
1	812.00~812.40	ペグマタイト	2	51.4
2	766.05~766.55	花崗岩	8	73.9
3	789.50~790.00	花崗岩	9	76.8
4	793.00~793.30	花崗岩	15	34.5
5	935.30~935.67	花崗岩	20	114.0
6	735.56~735.65	花崗岩	22	80.6
7	672.38~672.70	花崗岩	24	81.5
8	729.00~729.65	花崗岩	28	57.7
9	727.50~728.00	花崗岩	32	72.2
10	833.00~833.40	花崗岩	49	77.4
11	607.33~608.00	花崗岩	47	86.3
12	819.42~819.65	花崗岩	34	118.0
13	618.00~618.53	花崗岩	35	119.0
14	669.19~669.56	花崗岩	34	124.0
15	930.50~930.80	花崗岩	26	128.0
16	951.43~951.73	ペグマタイト	27	149.0
17	956.05~956.43	花崗岩	42	115.0
18	910.50~910.90	花崗岩	40	126.0
19	824.70~825.00	花崗岩	36	144.0
20	916.80~917.00	花崗岩	36	150.0
21	800.62~800.95	ペグマタイト	34	163.0
22	790.61~790.85	ペグマタイト	40	170.0
23	706.00~706.35	ペグマタイト	48	161.0
24	799.66~799.95	花崗岩	50	210.0
25	965.37~965.87	花崗岩	51	134.0
26	642.00~642.50	花崗岩	54	142.0
27	913.55~914.00	花崗岩	58	180.0
28	685.55~686.00	花崗岩	61	153.0
29	700.15~700.65	花崗岩	78	145.0
30	627.05~627.45	花崗岩	78	172.0
31	941.20~941.55	角閃石片麻岩	28	47.7
32	921.45~921.75	黒雲母片麻岩	30	70.2
33	909.65~910.00	黒雲母片麻岩	26	133.0
34	924.30~924.65	角閃石片麻岩	31	96.2
35	744.58~744.95	角閃石片麻岩	30	76.7
36	915.70~916.00	黒雲母片麻岩	35	146.0
37	634.00~634.18	黒雲母片麻岩	36	150.0
38	723.42~723.80	角閃石片麻岩	40	63.6
39	946.08~946.38	角閃石片麻岩	36	89.9
40	926.65~927.00	黒雲母片麻岩	42	105.0
41	933.48~934.00	黒雲母片麻岩	41	120.0
42	778.60~779.00	角閃石片麻岩	41	122.0
43	959.40~959.60	角閃石片麻岩	52	105.0
44	806.00~806.32	黒雲母片麻岩	52	141.0
45	809.13~809.57	角閃石片麻岩	61	115.0
46	824.70~825.00	角閃石片麻岩	61	139.0
47	970.25~970.70	角閃石片麻岩	63	148.0
48	694.00~694.41	角閃石片麻岩	82	146.0
49	614.00~614.18	角閃石片麻岩	85	129.0

試料34(角閃石片麻岩)：片麻構造とCZは大きく斜交。一軸圧縮試験によって、1つの卓越したシアクラックが2つのシアクラックを伴うようにして、CZに沿って形成されている。微細なアキシャルクラックも形成さ

れている。付随する2つのシアクラックは、アキシャルクラックを媒介して、卓越したシアクラックとリンクしている(図-15-34)。

試料35(角閃石片麻岩)：片麻構造とCZは大きく斜交。破壊試験によって、1つの卓越したシアクラックが、CZに沿って形成されている。このシアクラックに収斂する1つのアキシャルクラックも形成されている(図-15-35)。

試料36(黒雲母片麻岩)：肉眼ではぶどう石脈は認められるがカタクレサイト化は認められない(図-18)。ぶどう石脈は片麻構造よりコア軸に高角度をなすものが多い。試験試料に接した試料の顕微鏡観察によれば、石英の波動消光、ぶどう石脈、黒雲母の緑泥石化は認められるが、カタクレサイト化は認められない(図-18)。一軸圧縮試験によって、1つの卓越したシアクラックが、片麻構造に沿って形成されている。このシアクラックに収斂するアキシャルクラックも形成されている(図-18, 15-36)。

試料37(黒雲母片麻岩)：肉眼では顕著な片麻構造は認められるがカタクレサイト化は認められない。黒雲母のモード値は低く、片麻構造に沿って黒雲母の濃集する葉理構造も形成されていない。一軸圧縮試験によって、複数の片麻構造に平行なシアクラックが近接して形成され、この片麻構造平行シアクラックに沿った狭い帯に、微小なアキシャルクラックが狭いスペーシングで形成されている(図-15-37)。

試料38(角閃石片麻岩)：片麻構造とCZは大きく斜交(図-10 f)。一軸圧縮試験によって1つの卓越したシアクラックがCZに沿って形成され、アキシャルクラックも形成されている(図-10 f, 15-38)。

試料39(角閃石片麻岩)：片麻構造とCZは平行。一軸圧縮試験によって、CZに沿った強いシアクラックと強い1つのアキシャルクラックが形成され、シアクラックに沿った狭い帯には、微小なアキシャルクラックが狭いスペーシングで形成されている(図-15-39)。

試料40(黒雲母片麻岩)：片麻構造に沿ってカタクレサイト化を示す。一軸圧縮試験によって形成された組織は、CZに沿った2つのシアクラックが1つのアキシャルクラックを媒介してリンクし、シアクラックに沿った狭い帯における狭いスペーシングをもつ微小なアキシャルクラック群の発達である(図-9 d, 15-40)。

試料41(黒雲母片麻岩)：片麻構造に沿って微弱にカタクレサイト化を示す。一軸圧縮試験によって、この微弱なCZに沿ったシアクラックと微弱なアキシャルクラック群のリンクによる狭い破碎帯が形成されている(図-9 f, 15-41)。

試料42(角閃石片麻岩)：片麻構造に沿って微弱にカタクレサイト化を示す。一軸圧縮試験によって、この微弱なCZに沿ったシアクラックと微小なアキシャルクラック群がリンクする破壊組織が形成されている。シアクラックとリンクしたアキシャルクラックには顕著な開口が認められる。狭いスペーシングで発達するアキシャルクラック群には、それに直交する微細クラック群が形

成されている(図-15-42)。

試料43(角閃石片麻岩)：片麻構造の角閃石に富む薄層に沿ってカタクレサイト化を示す。このCZに沿ったシアクラックと1つの強いアキシャルクラックが形成されている。また、シアクラックに沿った狭い帯における狭いスペーシングをもつ微小なアキシャルクラック群の発達が認められる。シアクラックに沿った滑りは、この微小なアキシャルクラックに開口をもたらしている(図-9 e, 15-43)。

4.2.1.2 領域Ⅲの破壊構造

試料44(黒雲母片麻岩)：片麻構造に沿って微弱にカタクレサイト化を示す。一軸圧縮試験によって形成された組織では、アキシャルクラックが卓越する。狭いスペーシングのアキシャルクラック群に伴うそれに垂直な微小クラックと微弱なCZに沿ったシアクラックも認められる(図-15-44)。

試料45(角閃石片麻岩)：片麻構造の発達もカタクレサイト化も弱い。一軸圧縮試験によって形成された組織としては、狭いスペーシングをもつ微小なアキシャルクラック群とそれに垂直な微小クラックが認められる(図-15-45)。

試料46(角閃石片麻岩)：片麻構造に沿ってカタクレサイト化が顕著であるが、コア軸に低角度をなす数本の極めて微細な変質脈も認められる(図-10 a)。一軸圧縮試験によって、強いアキシャルクラックとコア軸に低角度をなす変質脈に沿ったシアクラックが形成されている。それらがリンクしているところでは、シアクラックに沿った滑りによるアキシャルクラックの開口が認められる(図-10 a, 15-46)。

試料47(黒雲母片麻岩と角閃石片麻岩の互層)：片麻構造に沿ったカタクレサイト化を示す。コア軸に低角度をなす数本の極めて微細な変質脈も認められる(図-10 b)。試験試料に接した試料の顕微鏡観察においても、片麻構造に沿ったカタクレサイト化と、それに高角度をなす微細な変質脈が認められる(図-7 a)。カタクレサイト化による黒雲母の緑泥石化とキンキングが顕著で、石英・長石の細粒化が認められる(図-7 b, c)。一軸圧縮試験によって形成された組織では、強いアキシャルクラックとコア軸に低角度をなす変質脈に沿ったシアクラックが顕著。黒雲母のモード値の変化による岩相変化は、岩相境界でアキシャルクラックの方位に屈折をもたらしている(図-15-47)。

試料48(角閃石片麻岩)：片麻構造に沿ったカタクレサイト化を示す。一軸圧縮試験によって形成された組織としては、強いアキシャルクラックが顕著(図-15-48)。

試料49(角閃石片麻岩)：片麻構造に沿ったカタクレサイト化を示す。コア軸に中～低角度をなす極めて微細な変質脈も認められる(図-10 c)。一軸圧縮試験によって形成された組織としては、強いアキシャルクラックと、コア軸に中～低角度をなす変質脈に沿ったシアクラック

が認められる。狭いスペーシングをもつ微小なアキシャルクラック群が発達するところでは、それに垂直な微小クラックが認められる (図-10 c, 15-49)。

4.2.2 花崗岩類

4.2.2.1 領域Ⅰの破壊様式

試料1 (ペグマタイト) : 黒雲母の配列する片麻構造に沿って微弱なCZが発達 (図-4 a)。一軸圧縮試験によって、CZに沿った多くの微小なアキシャルクラックが試料全体を通して形成されている。その多くはCZに沿うのであるがシャープでもなく直線的でもなくうねうねしている (図-4 a, 17-1)。

試料2 (花崗岩) : 片麻構造はコア軸にほぼ垂直であり、CZの主要なトレンドはコア軸にほぼ平行である (図-10 d)。試験試料に接した試料の顕微鏡写真 (図-3 a) は、片麻構造に高角度なCZの発達を明瞭に示している。一軸圧縮試験によって、多くの微小なアキシャルクラックが試料全体を通して形成されている。その多くはCZに沿うのであるがシャープでもなく直線的でもなく、うねうねしている。コア軸に斜交するCZに沿ってシアクラックが発達している (図-10 d, 17-2)。

試料3 : 片麻構造はコア軸にほぼ平行であり、それに沿ってCZが発達する。試験試料 (第11 d 図) と試験試料に接した試料のCZに垂直な薄片の顕微鏡写真 (図-5) から、片麻構造とCZの平行関係およびCZの組織の特徴を読み取ることが出来る。緑泥石・白雲母・石英の顕著な平行配列がCZを規定している。一軸圧縮試験によって、CZに沿う多くのアキシャルクラック形成されている。しかし、いずれもシャープでもなく直線的でもなく、うねうねしている (図-11 d, 17-3)。

試料4 : 試験試料 (図-2 d) と試験試料に接した試料のCZに垂直な薄片の顕微鏡写真 (図-6) から読み取れる片麻構造は、コア軸に約15°斜交しており、それに沿ってCZが発達する。一軸圧縮試験によって、CZに沿う多くのアキシャルクラックが試料全体を通して形成されている (図-11 a, 17-4)。1つのシアクラックを除いて微小である。いずれもシャープでもなく直線的でもなく、うねうねしている。

4.2.2.2 領域Ⅱの破壊様式

試料5 (花崗岩) : 片麻構造に大きく斜交し、コア軸に低角度をなす微弱なCZが発達する。一軸圧縮試験によって、このCZに沿った1つのシアクラックとその末端部に微小なアキシャルクラック群が形成されている (図-17-5)。

試料6 (花崗岩) : 黒雲母に富む片麻状花崗岩。片麻構造に大きく斜交しコア軸に低角度をなす微弱なCZが発達する。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、CZに沿った1つの強いシアクラックと、このクラックに収斂し共役的な関係にあるいまひとつのシアクラック

である。後者は黒雲母に富む片麻構造に沿うように形成されている。CZに沿ったシアクラックの末端部には、微小なアキシャルクラック群が形成されている (図-17-6)。

試料7 (花崗岩) : 片麻構造は極めて弱い。コア軸に低角度をなすCZが発達する (図-10 e)。一軸圧縮試験によって、CZに沿った1つのシアクラックとそれとリンクする強いアキシャルクラックが形成されている。シアクラックから分岐する微小なアキシャルクラック群が形成されている (図-10 e, 17-7)。

試料8 (花崗岩) : 片麻構造に沿った変質脈とCZの形成が明瞭。一軸圧縮試験によって、コアを縦断する強いアキシャルクラックとCZに沿ったシアクラックが形成されている。このシアクラックに付随してやや長いアキシャルクラック群が狭いスペーシングで形成されている (図-17-8)。

試料9 (花崗岩) : 黒雲母に富む片麻状花崗岩。片麻構造に沿った微弱なCZが発達する。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、コア軸に低角度をなしCZに沿った狭い帯に発達する狭いスペーシングのアキシャルクラック群である。この帯にはまた、CZに沿ってあまり強くないシアクラックが形成されている (図-17-9)。

試料10 (花崗岩) : 片麻構造に沿って顕著なCZが発達する (図-2 e)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、CZに沿った強いシアクラックとこのクラックに沿った狭い帯に発達する微小なアキシャルクラック群である (図-11 b, 17-10)。

試料11 (花崗岩) : 黒雲母に富む粗粒片麻状花崗岩。片麻構造に沿ったCZが発達する。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、粗粒黒雲母に富むCZに沿ったシアクラックと、それに伴って発達する狭いスペーシングのアキシャルクラック群からなる狭い帯である (図-17-11)。

試料12 (優白質花崗岩) : 強い片麻構造をもつ正片麻岩。片麻構造に沿って微弱なCZが発達。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、コアを縦断する1つの強いアキシャルクラックとCZに沿ったシアクラックであり、シアクラックに沿って微小アキシャルクラック群も認められる (図-17-12)。

試料13 (花崗岩) : 強い片麻構造をもつ花崗岩。片麻構造に沿って微弱なCZが発達。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、コアを縦断する数本の強いアキシャルクラックとCZに沿った2つの強いシアクラックであり、シアクラックに沿って微小アキシャルクラック群も認められる (図-17-13)。

試料14 (花崗岩) : コア軸に高角度をなす微弱な片麻構造とコア軸に低角度をなすCZが発達する (図-11 e)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、コアを縦断する1つの強いアキシャルクラックとCZに沿った1つのシアクラックであるが、シアクラックはアキシア

ルクラックとリンクしてステップを形成している。シアクラックに沿った狭い帯に、多くの微細なアキシャルクラックが狭いスペイシングをもって発達する。このアキシャルクラックを横断する微細クラックの発達により、アキシャルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-11 e, 17-14)。

試料15(花崗岩)：黒雲母に富む片麻状花崗岩(図-2 a)。片麻構造に沿って極めて微弱なCZが発達する。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、コア軸に低角度をなす帯におけるアキシャルクラック群である。この帯にはまた、帯のトレンドに斜交し片麻構造に沿って、微弱なシアクラックが発達する(図-17-15)。

試料16(ペグマタイト)：片麻構造とそれに沿ったCZも極めて微弱(図-4 b)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、シャープなアキシャルクラック群である。このクラック群は、狭いスペイシングをもって、コア軸のまわりに鋭角をなす共役的な幅広い帯を形成して発達する(図-4 b, 17-16)。

試料17(花崗岩)：黒雲母に富む花崗岩であるが、片麻構造は微弱。片麻構造はコア軸に高角度。微弱なCZがコア軸に低角度で片麻構造に大きく斜交して発達する。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、アキシャルクラック群である。このクラック群の分散は顕著であるが、CZのトレンドに沿った幅広い帯への集中も認められる。この帯の中には、CZと片麻構造に沿った微弱なシアクラックも認められる(図-17-17)。

試料18(花崗岩)：片麻構造は微弱。CZはコア軸に中角度で片麻構造に沿って発達するが微弱である。一軸圧縮試験によって、コアを縦断する強いアキシャルクラックとともに、シャープな微小なアキシャルクラック群が、狭いスペイシングをもって、コアの中央部でコアを横断して幅広い帯をなして形成され、特にコアを縦断する強いクラックの外側のコア周縁部で幅広く形成されている。このアキシャルクラック群を横断する微細クラックの発達により、アキシャルクラック群に囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-17-18)。

試料19(花崗岩)：石英分布がやや不均質な片麻状花崗岩。肉眼的にはカタクレサイト化は認められない(図-2 b)。一軸圧縮試験によって、コアを縦断する1つの強いアキシャルクラックとともに、シャープではあるが小さなアキシャルクラック群が、狭いスペイシングをもって、コア軸に低角度をなす幅広い帯に形成されている。この帯には片麻構造に沿ったシアクラックも僅かに認められる。アキシャルクラック群が分布する帯は、クラックがほとんど発達しない帯—片麻構造に平行—によって分断されている(図-17-19)。

試料20(優白質花崗岩)：片麻構造はコア軸に高角度で微弱。CZは片麻構造に斜交しコア軸に中角度で発達するが微弱である。一軸圧縮試験によって、コアを縦断する数本の強いアキシャルクラックとともに、シャープな微小なアキシャルクラック群が、狭いスペイシングを

もって、コアの中央部でコアを横断する帯をなして形成されている。この微小なアキシャルクラック群を横断する微細クラックの発達により、アキシャルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が折れ曲がっている(図-17-20)。

試料21(ペグマタイト)：片麻構造とそれに沿ったCZも発達するが微弱(図-4 c)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、シャープなアキシャルクラック群とCZに沿った1つの強いシアクラックである。アキシャルクラック群は、狭いスペイシングをもって、コアの中央部でコアを横断して幅広い帯を形成して発達。このアキシャルクラック群を横断する微細クラックの発達により、アキシャルクラックに囲まれた細い板状ペグマタイトが折れ曲がっている(図-4 c, 17-21)。

試料22(ペグマタイト)：片麻構造とそれに沿ったCZも極めて微弱。このことは、図-4 dと図-4 eに示されているように、試験試料に接した試料の顕微鏡観察によって確認されている。図-4 dの上端に発達するCZの拡大写真が図-4 eである。石英を横断するカタクレサイト帯には、母晶石英に由来した伸長した石英粒とランダムに充填した母晶とは異なる微細長石片が観察される。他のペグマタイト試料(1, 16, 21)に発達するCZも、このような性状の構造であろう。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、シャープなアキシャルクラック群とCZに沿ったシアクラックである。アキシャルクラック群は、狭いスペイシングをもって、コアを通して発達するが、特にコアの中央部でコアを横断する幅広い帯を形成して発達する傾向がある。このアキシャルクラック群を横断する微細クラックの発達により、アキシャルクラックに囲まれた細い板状ペグマタイトが折れ曲がっている(図-17-22)。

4.2.2.3 領域Ⅲの破壊様式

試料23(ペグマタイト)：片麻構造とそれに沿ったCZも極めて微弱。このペグマタイト試料には多様な方向の多数の微細な緑簾石脈が認められる。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、数本のシャープで長いアキシャルクラックとそれに付随する微細なアキシャルクラックである。CZに沿った微弱なシアクラックと、このシアクラックとのリンクによるアキシャルクラックのステップも認められる(図-17-23)。

試料24(優白質花崗岩)：片麻構造が顕著な正片麻岩で、片麻構造を横断する緑簾石脈が認められる(図-2 c)。肉眼的にはカタクレサイト化は認められない(図-2)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、狭いスペイシングをもって発達するシャープなアキシャルクラック群である(図-17-24)。主としてコアの中央部でコアを横断する幅広い帯に分布する。このアキシャルクラック群を横断する微細なクラックの発達により、アキシャルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-17-24)。

試料25(花崗岩)：著しく黒雲母に富む粗粒花崗岩。

片麻構造は弱くカタクレサイト化も微弱である。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、シャープなアキシアルクラック群であるが、ところどころで狭いスペイニングをもって発達する(図-17-25)。狭いスペイニングのアキシアルクラック群に伴って、それを横断する微細なクラックが発達し、アキシアルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-17-25)。

試料26(花崗岩)：微細な黒雲母に富む花崗岩。片麻構造は弱くカタクレサイト化も微弱である。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、数本の強いアキシアルクラックと、狭いスペイニングをもって発達するシャープな微小アキシアルクラック群である(図-17-26)。主としてコアの中央部でコアを横断する幅広い帯に分布する。このアキシアルクラック群を横断する微細なクラックの発達により、アキシアルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-17-26)。

試料27(花崗岩)：アプライト質花崗岩(図-11f)。片麻構造は弱くカタクレサイト化は認められない(図-8c)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、数本の強いアキシアルクラックと、狭いスペイニングをもって発達するシャープな微小アキシアルクラック群である(図-11f, 17-27)。主としてコアの中央部でコアを横断する幅広い帯に分布する。このアキシアルクラック群を横断する微細なクラックの発達により、アキシアルクラックに囲まれた細い板状花崗岩が、折れ曲がっている(図-11f, 17-27)。

試料28(花崗岩)：黒雲母にやや富む花崗岩。片麻構造は弱くカタクレサイト化も微弱である。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、数本の強いアキシアルクラックであるが、狭いスペイニングをもって発達する微小アキシアルクラック群も認められる(図-17-28)。微小アキシアルクラックの発達程度は、試料24, 26, 27ほどには顕著ではない。これらの試料では、微小アキシアルクラック群が発達する位置で、試料はピア樽状に膨れているが、この試料では、このような変化は微弱であり、むしろ強いアキシアルクラックが発達する試料上部で膨らみが認められる(図-17-28)。

試料29(花崗岩)：片麻構造に沿ってかなりカタクレサイト化している(図-11c)。試験試料に接した試料の顕微鏡観察から、多数の微細なカタクレサイト帯が発達しているものと考えられる(図-3c, d)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、数本の強いアキシアルクラックであるが、微弱ではあるが狭いスペイニングをもって発達する微小アキシアルクラック群も認められる(図-17-29)。

試料30(花崗岩)：片麻構造に沿って全体として著しく強くカタクレサイト化している(図-2f)。カタクレサイト化の弱い部分をレンズ状岩片として含む片状構造CZを形成している(図-2f)。一軸圧縮試験によって形成された主要な組織は、狭いスペイニングをもって

発達するアキシアルクラック群である。試料の中央部に、CZに沿った微小なシアクラックとアキシアルクラックのリンクによる1つの強い開口クラックが認められる(図-17-30)。

5. 考察と結論

5.1 変成岩

以上の記載結果にしたがって、変成岩の破壊様式として、次の諸点が指摘される。

- (1) 領域Ⅱと領域Ⅲで破壊様式が明瞭に異なる。各領域内において破壊様式は同じである。
- (2) 領域Ⅱにおける卓越した破壊様式
 - ・カタクレサイト化が認められるところでは、CZ(カタクレサイト帯)に沿った1~2のシアクラックが形成されている。
 - ・カタクレサイト化がほとんど認められないところでは、片麻構造に沿った1~2のシアクラックが形成されている。
 - ・卓越したシアクラックに付随した狭い帯に微小なアキシアルクラック群が形成されている。このような帯の形成は β が大ききところでより一般的であるように見える。
 - ・シアクラックから独立した強いアキシアルクラックの発達は希である。
- (3) 領域Ⅲにおける卓越した破壊様式
 - ・シャープで強いアキシアルクラックの形成が特徴的である。
 - ・シアクラックの形成は希である。
- (4) 領域Ⅱで低い強度を示す片麻岩類($\sigma-\beta$ 図上で、試料42, 41, 34より下にある試料)は、カタクレサイト化を示し、CZに沿ったシアクラックの形成によって破壊している。
- (5) 領域Ⅱで強度の最大値を示す片麻岩類(試料33, 36, 37)では、カタクレサイト化はほとんど認められない。カタクレサイト化の過程に形成された構造は、黒雲母の緑泥石化と石英の圧力溶解、石英の波動消光にすぎず、破碎構造は認められない。
- (6) これに対して、領域Ⅲで強度の最大値—領域Ⅱの強度の最大値と同じ強度—を示す片麻岩(試料47)は、強度の最小値を示す片麻岩類と同様、強いカタクレサイト化を示している。
- (7) したがって、領域Ⅲでは、カタクレサイト化がほとんど認められない試料の一軸圧縮試験資料が欠如しており、片麻岩のもつ強度の最大値は不明であると考えられる。
- (8) $\sigma-\beta$ 図上で β の変化に対する強度の最低値の変化(試料31→試料38→試料43→試料45→試料49に沿った変化)は、強いカタクレサイト化を示す試料における、 β に依存した強度変化を示す。
- (9) $\sigma-\beta$ 図上で同じ β での強度変化(試料31→試料36

→試料37に沿った変化)は、カタクレーサイト化の程度の差を反映したものである。

- (10) したがって、 $\sigma-\beta$ 図は、強いカタクレーサイト化を示す試料についての β の変化に対する強度変化経路(図-19の領域II-A→領域III-A)と、カタクレーサイト化をほとんど示さない試料についての β の変化に対する強度変化経路(図-19の領域II-B→領域III-B)に区分されるよう。領域III-Bは推定である。

5.2 花崗岩類

花崗岩類の破壊構造については、先頁における記載結果にしたがって、次の諸点が指摘される。

(1) 領域Iにおける卓越した破壊様式

- クラックはCZに沿って発達する。
- クラックは、シャープではなく、直線的ではなく、ギザギザした形状や曲がった形を示すものが一般である。
- クラックの主体は、アキシアルクラックに相当する方位を示すが、それからずれた方位のクラックとリンクし、ギザギザした形状や曲がった形状が形成されている。
- 肉眼ではクラックの開口はほとんど認められない。
- ピア樽状の変形様式は認められない。

(2) 領域IIに見られる破壊様式

- 破壊様式から、領域IIは、概略4つの領域(領域II-I～領域II-IV)に区分される(図-20)。
- 領域II-I：CZに沿った一黒雲母に富む片麻構造が発達するところでは、CZとともに片麻構造に沿った1～2の強いシアクラックの形成と、その末端におけるシャープなアキシアルクラックの発達が認められる。 β が小さい試料5, 6, 7の分布域に相当する。
- 領域II-II：CZに沿った1～2のシアクラックと、それに付随した狭い帯にシャープな微小アキシアルクラック群が形成される。試料14, 12, 13, 8, 9, 11, 10の分布域で、低い強度では θ は 45° を越えて広がる。
- 領域II-III：コア軸に低角度をなす広い帯にシャープな微小アキシアルクラック群が形成される。シアクラックの形成による変形は付随的である。試料15, 16, 17, 18, 19の分布域で、 β が小さいところで高い強度域に広がり、 β が大きくなると低い強度域に広がる。
- 領域II-IV：コア軸に高角度をなす広い帯に、狭いスペーシングのシャープな微小アキシアルクラック群が形成され、コア中央部がピア樽状に膨れる変形様式が認められる領域である。シアクラックの形成による変形は付随的である。試料20, 21, 22の分布域で、 β が大きく高い強度域に広がる。
- 領域II-Iから領域II-IVへの変化(図-20)は、CZに沿ったシアクラックの形成が卓越した変形機

構となる領域から、シアクラックの形成は伴うが、シャープなアキシアルクラックの形成が卓越した変形機構となる領域への変化である。

(3) 領域IIIに見られる破壊様式

- 領域IIIは、シャープなアキシアルクラックが卓越した変形機構となる領域。
- アキシアルクラックの発達様式から、領域IIIは、概略2つの領域(領域III-Iと領域III-II)に区分される(図-20)。
- 領域III-I：試料を縦断するシャープで強いアキシアルクラックが卓越的に形成される領域。試料23, 28, 30, 25, 26, 28の分布域で、低い強度域に広がる。
- 領域III-II：コア中央部を横断する幅広い帯に狭いスペーシングのシャープな微小アキシアルクラックが卓越的に形成され、コア中央部がピア樽状に膨れる変形様式が認められる領域である。このような破壊には、アキシアルクラックに囲まれた細長い岩片の屈屈とそれに伴うアキシアルクラックに直交する微細クラックの形成が関わっている。試料24, 27の分布域で、高い強度域に広がる。同じような変形様式は、領域II-IVでも認められるが、ここではCZに沿ったシアクラックが付随的ではあるが明瞭に発達する。
- 強くカタクレーサイト化した試料(低い力学強度を示す試料)の破壊様式からから見る時、図-20における領域I→領域II-I→領域III-Iという変化は、CZのコア軸に対する方位(β)に依存した変化を示し、CZに沿ったうねうねした割れ目の形成→CZに沿った滑り→CZに高角度な引張り割れ目の形成という破壊機構のシフトに対応している。
- したがって、強くカタクレーサイト化した試料(低い力学強度を示す試料)を見る時、領域I→領域II-I→領域III-Iという強度変化は、CZに平行な一軸圧縮強度、CZに沿った剪断強度、CZに垂直な一軸圧縮強度の相違を反映したものと考えられる。しかし、領域Iの強度特性の理解において留意すべき点は、試験試料内においてCZは、卓越的な配列方位をもつとしても、アナストモース的な分散を示すことである。領域Iで形成されるクラックのもつシャープでもストレートでもなくギザギザしたり、うねったりした形態は、CZのこのような幾何学的形態特性を反映した変形挙動の産物である。
- 同じ β での大きな強度変化は、カタクレーサイト化の程度を反映したものである。
- 領域IIで β が小さいところでは、カタクレーサイト化の程度の変化は、破壊様式の変化をもたらさない領域II-Iである(図-20)。
- 図-20に示された領域II-(I+II)→領域II-III→領域II-IVという変化は、カタクレーサイト化の程度変化と β の変化に伴うCZに沿った剪断応力(resolved

shear stress) の変化を反映した、破壊様式の変化である。

5.3 破壊様式の総括

以上の解析によって、(1)変成岩の $\sigma-\beta$ 図(図-13)は、 $40^\circ < \beta < 90^\circ$ の領域において、カタクレサイト化による形状的構造の改変が微弱な試料のデータに欠けており、この領域では図の与える情報は、カタクレサイト化によって形状的構造の異方性を大きく獲得した変成岩に関してのみ有意であること、(2)花崗岩類の $\sigma-\beta$ 図(図-14)の与える情報は、カタクレサイト化による形状的構造の改変が微弱なものから顕著なものまで広がってはいるが、微弱なものについては、特に $\beta < 20^\circ$ と $50^\circ < \beta$ の2領域で、情報量が充分ではないこと、(3)このため変成岩と花崗岩類の $\sigma-\beta$ 図(図-13, 14)の与える情報の比較は、 $40^\circ < \beta < 90^\circ$ の領域ではカタクレサイト化によって形状的構造の異方性を大きく獲得した試料についてのみ可能であること、(4) $0^\circ < \beta < 25^\circ$ の領域では変成岩に関する資料がない、(5)このため、変成岩と花崗岩の $\sigma-\beta$ 図(図-13, 14)の与える情報の比較は、 $25^\circ < \beta < 37^\circ$ の領域でのみ、カタクレサイト化による形状的構造の改変が微弱なものから顕著なものまでの間で可能であることが明らかにされた。

$25^\circ < \beta < 37^\circ$ の領域は、領域IIに属している。この領域での変成岩と花崗岩の強度は、 $\sigma-\beta$ 図(図-13, 14)で、カタクレサイト化による形状的構造の改変が微弱なものでも顕著なものでも、ベグマタイトを除いて両者が同じ値を示している。ベグマタイトは微弱ながらカタクレサイト化を示すものであるが、より高い強度を示している。

このような解析結果から、カタクレサイト化によって形状的構造の改変を強く受けた変成岩(片麻岩)と花崗岩(片麻状花崗岩)の一軸圧縮強度特性は、 β の増加とともに強度が増加する関係を示すことが指摘出来るよう(図-12)。このような力学強度特性は、これまで多くの研究者によって解析されてきた片状岩(スレート、フィライト、結晶片岩、片麻岩; カタクレサイト化によって形状的構造の異方性の改変を受けていない片状岩)のそれ(Donath, 1964⁷⁾; Hoek, 1964⁶⁾; Chenevert & Gatlin, 1965⁸⁾; Deklotz et al., 1966¹⁾; McLamore & Gray, 1967⁹⁾; Hoek, 1968¹⁰⁾; Akai, 1971²⁾; Attewell & Sanford, 1974¹¹⁾; McCabe & Koener, 1975¹⁴⁾; Brown et al., 1977¹²⁾; Singh et al., 1989¹⁵⁾; Ramamurthy et al., 1993¹⁶⁾; Behrestaghi et al., 1996²⁷⁾; 図-1のCase II)とは、全く異なるものである。

既往文献(図-1のCase II)と本研究(図-12, 19, 20)の $\sigma-\beta$ 図における最も重要な違いは、 $0^\circ < \beta < 30^\circ$ の領域に現れている。カタクレサイトでは、 β が約 25° より小さいところで、強度がより小さくなっている。この位置で、CZに沿ったうねうね

した割れ目の形成が主要機構となる領域I($0^\circ < \beta < 25^\circ$)から、CZに沿った滑りが変形の主要機構となる領域II($26^\circ < \beta < 50^\circ$)への移行が起こっている。このことは、領域IでのCZに沿ったうねうねした割れ目の形成に関わる変形強度が、領域IIでのCZに沿った剪断強度より低くなるということに対応する形状的構造特性をカタクレサイトがもつことを示唆している。

Ramamurthy et al. (1993)は、多様な封圧条件下でフィライトの圧縮強度異方性を検討し、次のように結論している: 「Towards the lower values of the orientation angle, the specimens tend to split along the weak planes (片理) at low confining pressure, . . . ; At 30° orientation, throughout the range of confining pressures, the specimens shear only along the weak planes. Towards the higher values of β , shearing across the weak planes. Towards the higher values of β , shearing across the weak planes is common at high confining pressures, whereas as the failure at low pressures is characterized by tensile failure.」。彼らの実験は、一軸圧縮試験では、 $\beta < 30^\circ$ で片理に沿ったsplittingによって変形するが、U型の強度異方性(Case II)となることを示した。この結果との比較によって明らかとなる問題は、 $\beta < 30^\circ$ でフィライトのもつ片理とカタクレサイトのもつCZが、全く異なる強度特性を示すのは何故かということである。

これまで多くの研究者が取り扱ってきたスレート、フィライト、結晶片岩、片麻岩は、応力場で塑性変形が進行するなかでの鉱物の結晶作用と再結晶作用を主要な機構として形成された岩石である。これらの岩石と片麻状花崗岩のもつ片状構造は、塑性変形が進行するなかでの結晶作用と再結晶作用によって出現した鉱物群が、顕著な形態定向配列と格子定向配列を示すまでの極めて大きな圧縮歪みによって形成される構造である。30%程度の圧縮歪みでは、一般に肉眼でかすかに見える程度の片状構造が岩石に刻印されるにすぎない(Cloos, 1947²⁾)。スレート、フィライト、結晶片岩、片麻岩、片麻状花崗岩の示す片状構造は、肉眼で容易に確認出来る構造で、岩石が極めて大きな圧縮歪みを受ける過程で鉱物の結晶作用と再結晶作用が起こったことを示している。これに対して、カタクレサイトは、地殻表層での断層現象の産物(Sibson, 1977²⁰⁾; Scholz, 1993³⁰⁾)で破砕岩であり、固結の過程を含むとしても、岩石鉱物の脆性的破壊を主要な機構として形成される岩石である。先頁の記載でも明らかなように、カタクレサイトにも構成鉱物群の形態定向配列によって規定される片状構造が観察されるものがあるが、それらは、スレート、フィライト、結晶片岩、片麻岩、片麻状花崗岩のもつ片状構造に比べて極めて弱いものである。

このような形成機構から、カタクレサイトには、岩石を構成する鉱物粒子の結合の程度が、スレート、フィライト、結晶片岩、片麻岩、片麻状花崗岩などに比較し

て極めて低いという形状の構造が想定される。また、カタクレーサイトのCZは、卓越的な配列方位をもつとしても分散を示し、アナストモース的な幾何学的構造特性を示すものである。このようなCZの幾何学的構造特性は、領域Ⅰの岩石が、微小クラックの連結により強い力学強度の柱をもたない変形挙動を示すことを意味している。試験結果(クラック・パターン)はそのことを良く示している。かくして、図-1のCaseⅡと図-12(図-19, 20)に見られる強度特性の相違は、おそらく上記のような岩石の形成機構の相違による形状の構造の相違を反映したものと説明出来るであろう。

領域Ⅱにおける強度の最低値は、変成岩と花崗岩類の間ではほぼ同じである。CZに沿った剪断強度は、変成岩と花崗岩類ではほぼ同じだと言うことであろう。これに対して、領域Ⅲにおける強度の最低値は、変成岩と花崗岩の間で異なっている。CZに沿った滑りが変形の主要機構となる領域ⅡからCZに高角度な張り割れ目の形成が主要機構となる領域Ⅲへの移行において、強度の不連続変化は、花崗岩で明瞭であるが、変成岩では明瞭ではない。微細なCZを多く挟む岩石では、CZに高角度な方向からの圧縮強度が両者の間で異なり、有色鉱物をより多く含む変成岩で低くなるのが読み取れる。

以上の解析結果から、上記のような同じ β での大きな強度変化と β の変化と対応した大きな強度異方性をもつ変成岩、花崗岩がトンネル断面内に現れる場合、どのような地山強度比分布とそれに対応する変形特性をもたらすことになるかについての検討が、極めて重要な検討課題であることが明らかになったと言えよう。この問題は次の報告において論じられることになる。

参 考 文 献

- 野沢 保, 河田清雄, 河合正虎(1975): 飛驒古川地域の地質, 5万分の1図幅, 地質調査所。
- 磯見 博, 野沢 保(1957): 船津, 5万分の1図幅説明書, 地質調査所。
- 阿部康則, 安江勝男, 原 郁夫(2003): 飛驒トンネルの地質断面解析(1), 応用地質年報, 22, pp.13~40。
- Al-Harthi, A. A. (1998): Effect of planar structures on the anisotropy of Ranyah sandstone, Saudi Arabia. Eng. Geol. 50, pp.49~57。
- Jager, J. C. (1960): Shear failure of anisotropic rocks. Geol. Mag. 97, pp.65~72。
- Heak. (1964): Fracture of anisotropic rocks. J. South Afr. Inst. Min. Metall. 64(10), pp.510~518。
- Donath, F. A. (1964): Strength variation and deformational behavior of anisotropic rocks. In: Judd, W. R. (Ed.), State of stress in the Earth's crust. Elsevier, New York, pp.281~298。
- Chenevert and Gatlin. (1965): Mechanical anisotropies of laminated sedimentary rocks. Soc. petrol. Eng. J., 5, pp.67~77。
- Mclamore and Gray. (1967): The mechanical behavior of anisotropic sedimentary rocks. Trans. Am. Soc. Mech. Eng., Series B, 89, pp.62~76。
- Hoek. (1968): Brittle failure of rock; Rock Mechanics in Engineering Practice. In: K. G. Stagg and O.C. Zienkiewicz (Editors), J. Wiley and Sons, London, pp.99~124。
- Attewell and Sanford. (1974): Intrinsic shear strength of a brittle anisotropic rock - I; Experimental and Mechanical Interpretation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 11, pp.423~430。
- Brown, E.T., Richards, L.R., Barr, M.V. (1977): Shear strength characteristics of Delabole states. Proceedings of the Conference of Rock Engineers, Newcastle Upon Tyne, pp.31~51。
- 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。
- Macabe, W. M. and Koener, R. M. (1975): High pressure shear strength of an anisotropic mica schist rock. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 12, pp.219~228。
- Singh, J., Ramamurth, T., Venkatappa, R. G. (1989): Strength of an anisotropic in rocks. Ind. Geotech. J. 19(2), pp.147~166。
- Ramamurthy, Venkatappa, R. G., Singh, J. (1993): Engineering behavior of phyllite. Eng. Geol. 33, pp.209~225。
- Horino, F. G. and Ellicson, M. L. (1970): A method of estimating the strength of rock containing planes of weakness. US Bureau Mines, Report Investigation, No.7449。
- Aora, V.K. (1987): Strength and deformational behavior of jointed rock. Ph. D. Thesis, Indian Institute of Technology, New Delhi, India。
- Pomeroy, C. D., Hobbs, D. W. and Mahmoud, A. (1971): The effect of weakness plane orientation on the fracture of Barnsley hard by triaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 8, pp.227~238。
- Allirot, D. and Boehler, J.P. (1979): Evolution of mechanical properties of a stratified rock under confining pressure. Proc. 4th Cong. ISRM. Montreux. 1, pp.15~22。
- Badiuzaman, M.Y., Shehata, W. M. (1993): Engineering geological aspect of the marble at Wadi turabah, Sauji Arabia. Egypt J. Geol. 37(2), pp.97~108。
- Sonobul, A., Sabtan, A., Shehata, W.M. (1993):

- On the improving of the marble productivity at Madrasah quarry, Saudi Arabia. *Ann. Geol. Surv. Egypt*, XIX(1003), pp.535~543.
- 23) Al-Lehyani, K. H., Shehata, W. M., Sabtan, A. (1996) : Effect of microfissures on the engineering properties of the marble at Wadi Lisb, Saudi Arabia. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol*, 52, pp.33~37.
 - 24) Al-Harhi, A. A., Shehata, W. M., Abo-Saada, Y. E. (1996) : Anisotropy of Wadi Lisb marble. *Arabian J. Sci. Eng.*, Dhahran, 22 (2A), pp.1~10.
 - 25) Hoek, E., Brown, E. T. (1982) : *Underground Excavations in Rock*. Stephen Austin and sons., Hertford, England, pp.118~134.
 - 26) Akai, K. (1971) : The failure surface of isotropic and anisotropic rocks under multiaxial stresses. *J. Soc. Mater. Sci.*, Japan, 20, pp.122~128.
 - 27) M. H. N. Behrestaghi, K. Seshagiri Rao, T. G. Ramamurthy. (1996) : Engineering geotechnical responses of schistose rocks from dam project areas in India, *Eng. Geol.* 44, pp.183~201.
 - 28) Cloos, E. (1947) : Oolite deformation of Southmountain fold, Maryland. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 58, pp.843~918.
 - 29) Sibson R.H. (1977) : Fault rocks and fault mechanisms. *J Geol Soc Lond*, 133, pp.191~213.
 - 30) Scholz, C.H. (1990) : *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge Univ. Press, p.439.



図-2 一軸圧縮試験に使用した6試料：カタクレサイト化をほとんど受けていない花崗岩（a=試料15, b=試料19, c=試料24）とカタクレサイト化を強く受けている花崗岩（d=試料4, e=試料10, f=試料30）

Fig. 2 Six specimens prepared for uniaxial compression test: only weakly cataclastically deformed gneissose granites (a = specimen 15, b = specimen 19, c = specimen 24) and highly cataclastically deformed gneissose granites (d = specimen 4, e = specimen 10, f = specimen 30).

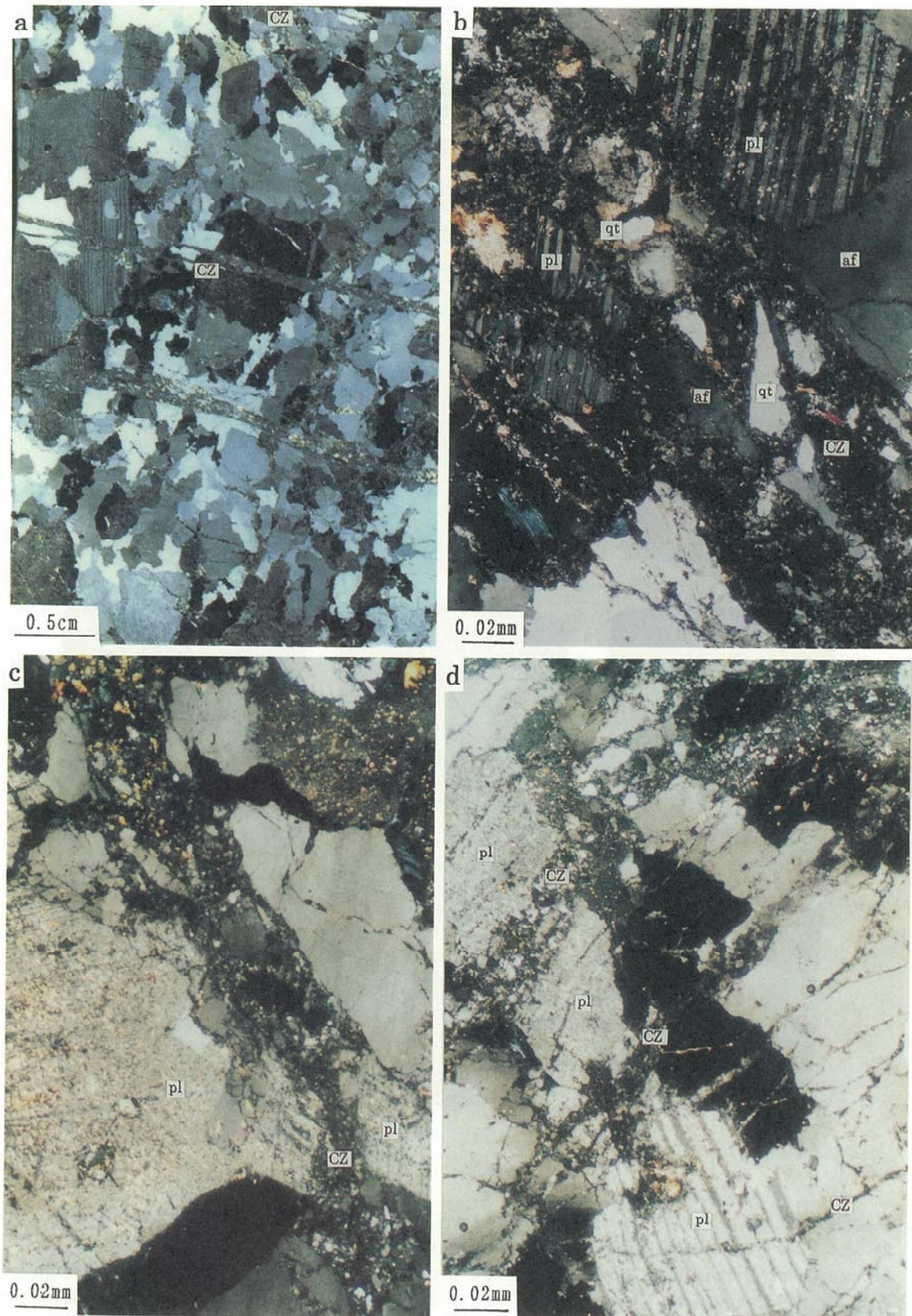


図-3 a : 試料2に接した花崗岩の顕微鏡写真。b : 写真aの微小カタクレーサイト帯 (CZ) の拡大写真。c と d : 試料29に接した花崗岩中の微小カタクレーサイト帯の顕微鏡写真。pl : 斜長石, qt : 石英, af : カリ長石

Fig. 3 a : microphotograph of granite in just contact with the specimen 2. b : enlarged microphotograph of cataclastic zone (CZ) in Fig.3a. c and d : microphotographs of cataclastic zones of granite in just contact with the specimen 29. pl:plagioclase, qt:quartz, af:K-feldspar.

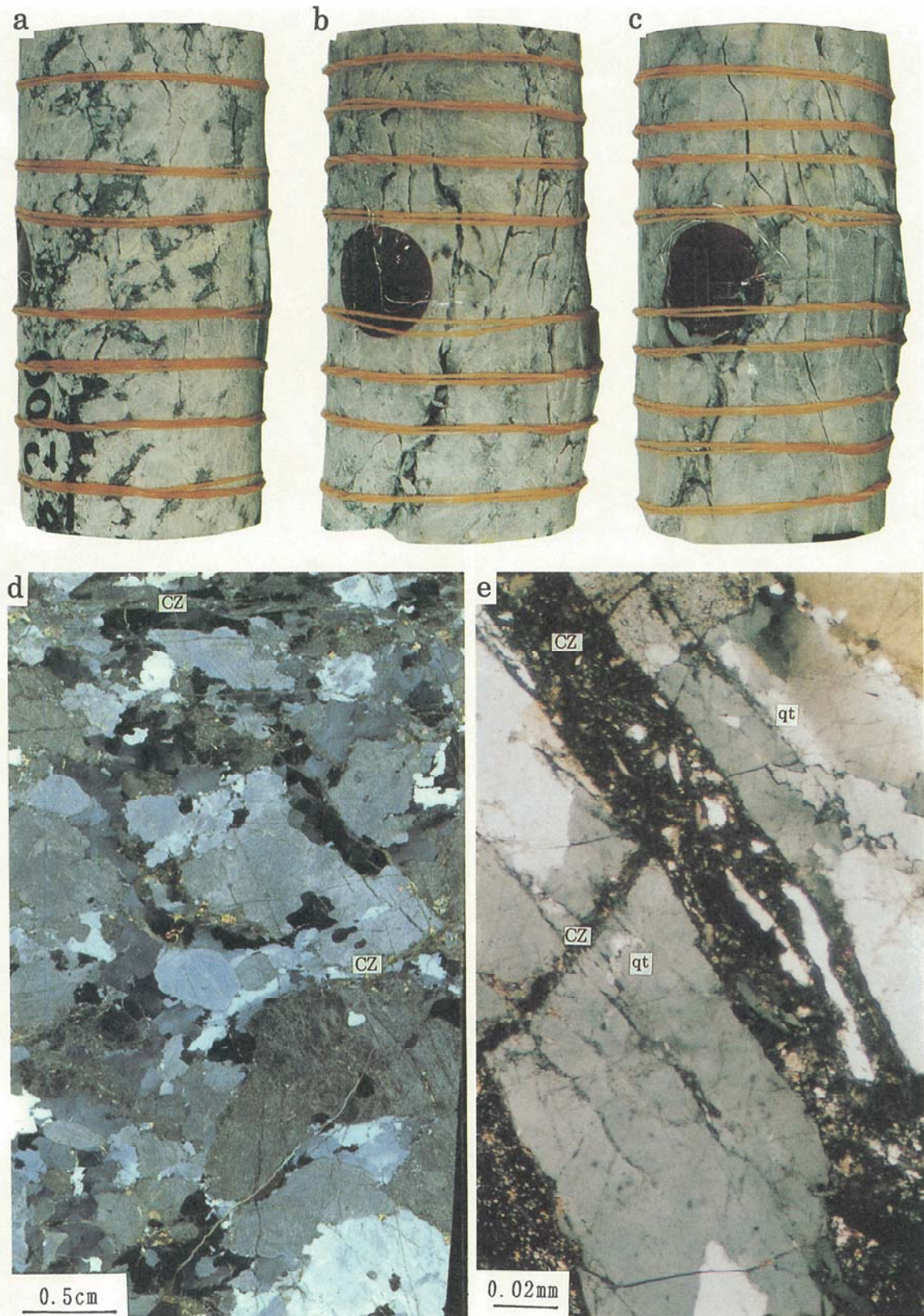


図-4 a～c : 一軸圧縮試験により変形した3ペグマタイト試料 (a = 試料1, b = 試料16, c = 試料21)。d : 試料22に接したペグマタイトの顕微鏡写真。e : 写真dのカタクレーサイト帯の拡大写真。
 Fig. 4 a～c: three pegmatite specimens experimentally deformed under unconfined compressive condition (a = specimen 1, b = specimen 16, c = specimen 21). d: microphotograph of pegmatite in just contact with the specimen 22. e: enlarged microphotograph of cataclastic zone in Fig.4d.

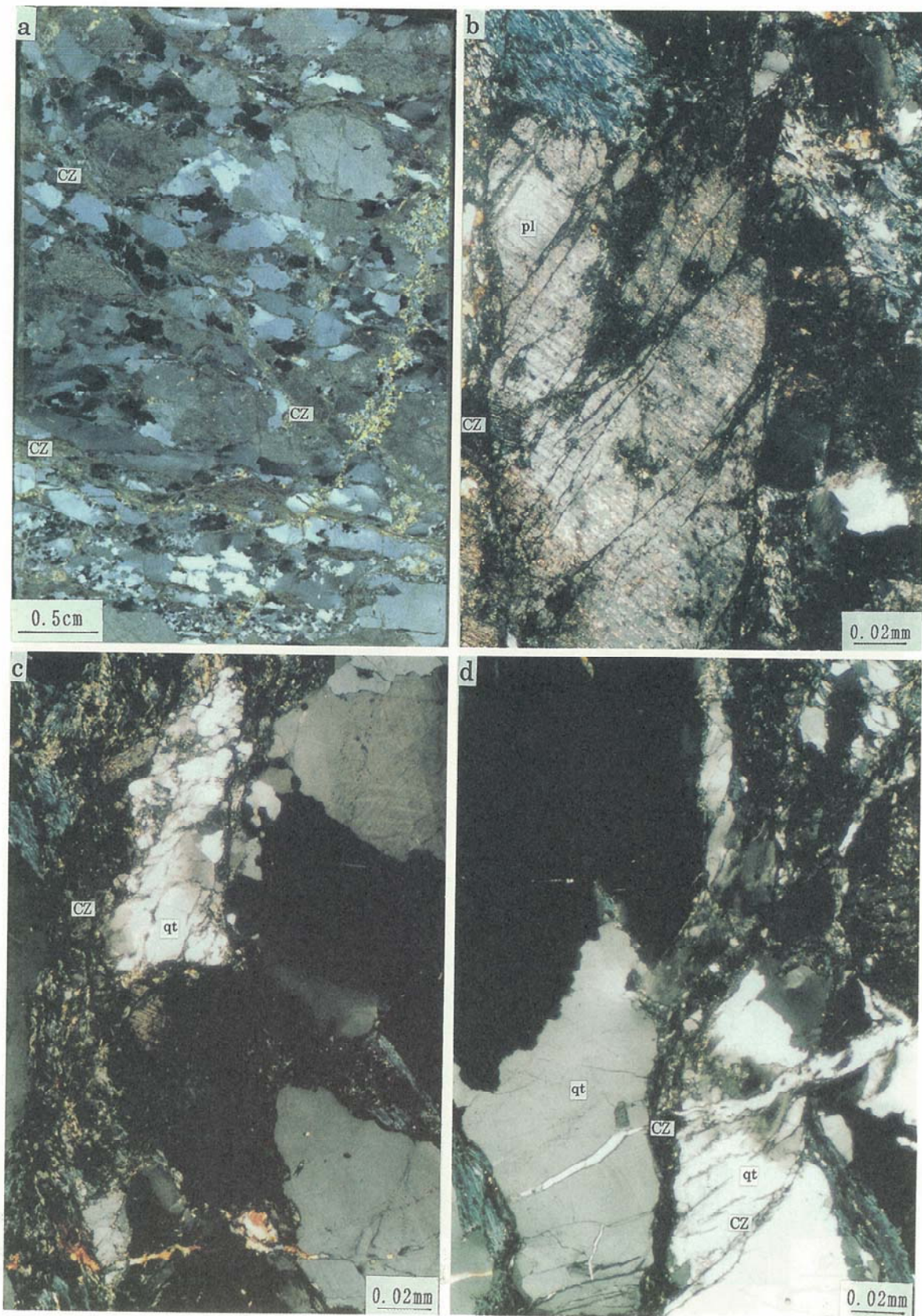


図-5 a : 試料3に接した花崗岩の顕微鏡写真。b～d : 写真aの中の微小カタクレーサイト帯の拡大写真。

Fig. 5 a: microphotograph of granite in just contact with the specimen 3. b～d: enlarged microphotographs of cataclastic zones in Fig.5a.

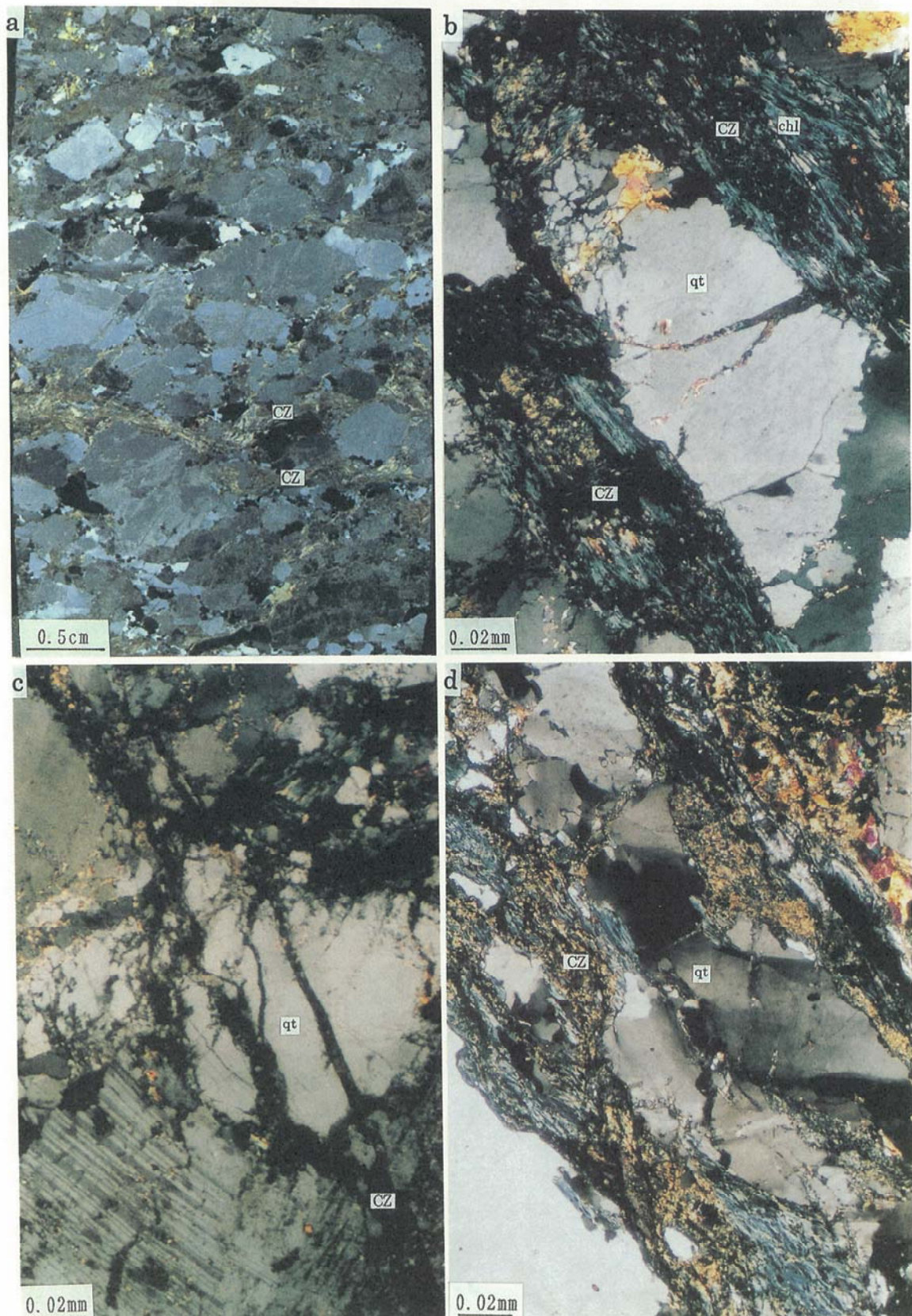


図-6 a : 試料4に接した花崗岩の顕微鏡写真。b~d : 写真aの中の微小カタクレーサイト帯の拡大写真。chl : 緑泥石, pr : ぷどう石

Fig. 6 a: microphotograph of granite in just contact with the specimen 4. b~d: enlarged microphotographs of cataclastic zones in Fig. 6 a. chl: chlorite, pr: prehnite.



図-7 a : 試料47に接した変成岩 (黒雲母片麻岩) の顕微鏡写真。b と c : 写真 a 中の弱くカタクレンサーサイト化を受けている部分 (c) と強くカタクレンサーサイトを
受けた部分 (d) の拡大写真。bi : 黒雲母。

Fig. 7 a: microphotograph of metamorphic rock (biotite gneiss) in just contact with the specimen 47. b and d: enlarged microphotographs of
weakly cataclastically deformed part (b) and strongly cataclastically deformed part (d) in Fig. 7a. bi:biotite.

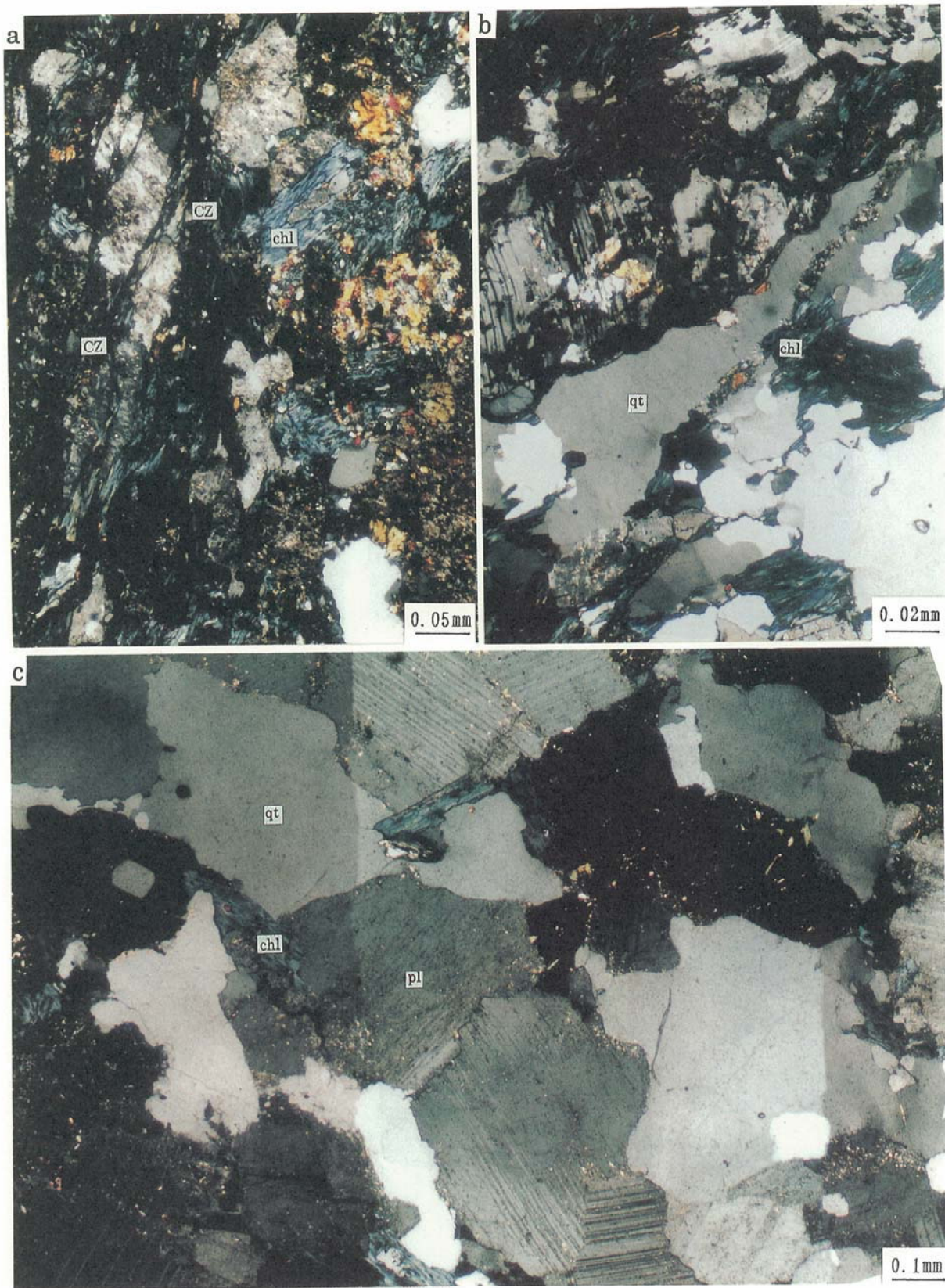


図-8 a : 試料31に接した変成岩(角閃石片麻岩)中のカタクレサイト帯の顕微鏡写真。b : 試料33に接した変成岩(黒雲母片麻岩)中のカタクレサイト化の時相に形成された組織の顕微鏡写真。c : 試料27に接した花崗岩の顕微鏡写真。
 Fig.8 a: microphotograph of metamorphic rock (hornblende gneiss) in just contact with the specimen 31. b: microphotograph showing microtexture of metamorphic rock (biotite gneiss) in just contact with the specimen 33, that was produced during the phase of cataclasis in the Hida zone. c: microphotograph of granite in just contact with the specimen 27.

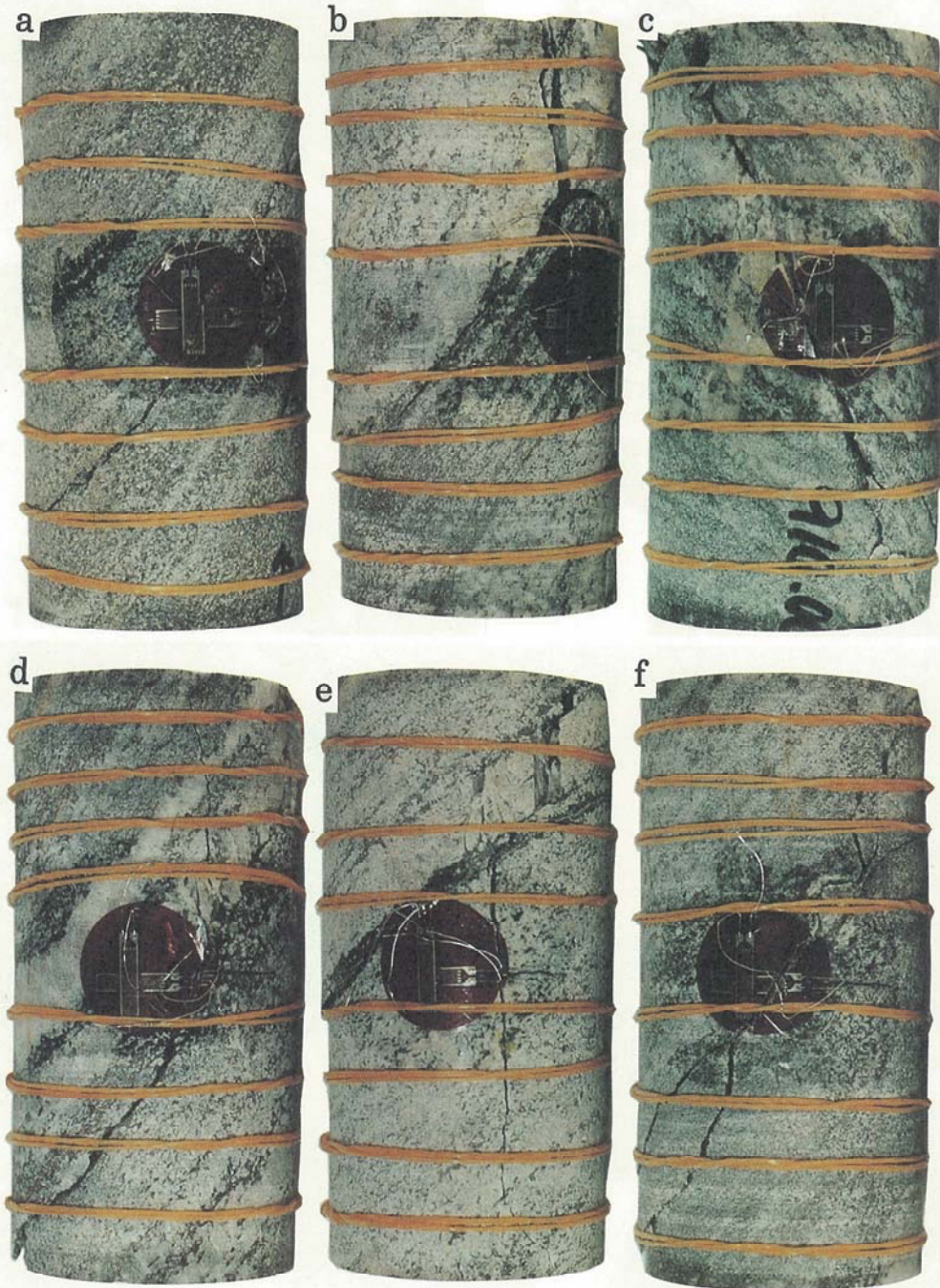


図-9 一軸圧縮試験により変形した6片麻岩試料 (a = 試料31, b = 試料32, c = 試料33, d = 試料40, e = 試料43, f = 試料41)。
 Fig. 9 Six specimens of gneisses experimentally deformed under unconfined compressive condition (a = specimen 31, b = specimen 32, c = specimen 33, d = specimen 40, e = specimen 43, f = specimen 41).

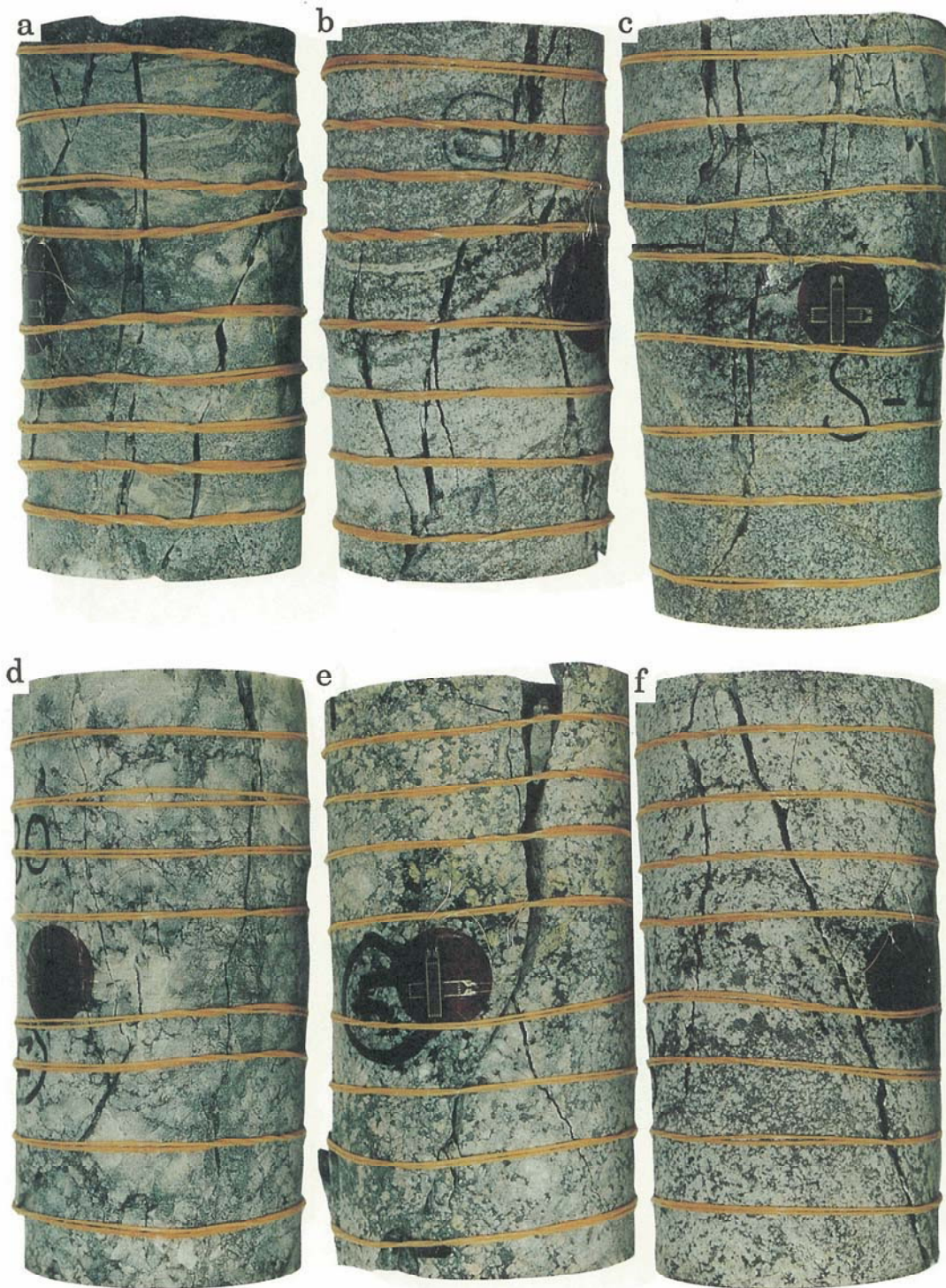


図-10 一軸圧縮試験により変形した4片麻岩試料 (a = 試料46, b = 試料47, c = 試料49, f = 試料38) と2花崗岩試料 (d = 試料2, e = 試料7)。d ~ f : 片麻構造とカタクレーサイト帯 (CZ) が斜交している試料。

Fig.10 Four specimens of gneisses (a = specimen 46, b = specimen 47, c = specimen 49, f = specimen 38) and two specimens of granite (d = specimen 2 and e = specimen 7) experimentally deformed under unconfined compressive condition. d ~ f: specimens with cataclastic zones (CZ) oblique to the gneissosity.



図-11 一軸圧縮試験により変形した6花崗岩試料 (a = 試料4, b = 試料10, c = 試料29, d = 試料3, e = 試料14, f = 試料27)。

Fig.11 Six specimens of granite experimentally deformed under unconfined compressive condition (a = specimen 4, b = specimen 10, c = specimen 29, d = specimen 3, e = specimen 14 and f = specimen 27).

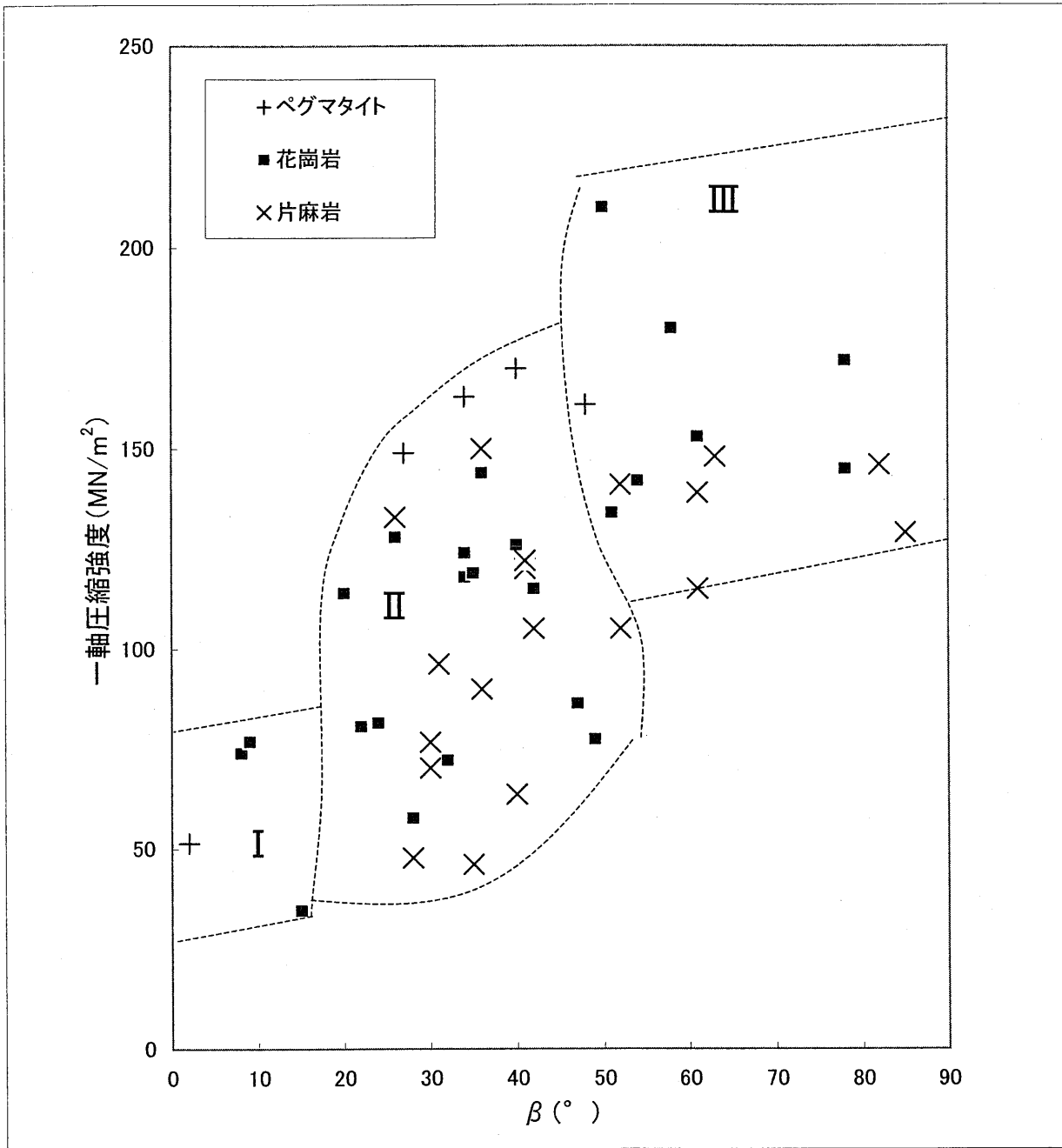


図-12 多様な程度にカタクレーサイト化した花崗岩(黒四角), ペグマタイト(+), 片麻岩(×)の一軸圧縮強度- β 図。I, II, III: 強度の不連続変化による領域区分(領域I, 領域II, 領域III)。(詳細は本文)。

Fig.12 Uniaxial compressive strength- β diagram for variously cataclastically deformed granite (solid squares), pegmatite (+) and gneisses (×). I, II, III: domain division based on discontinuous change of uniaxial compressive strength (domain I, domain II and domain III respectively). For fuller explanation see the Text.

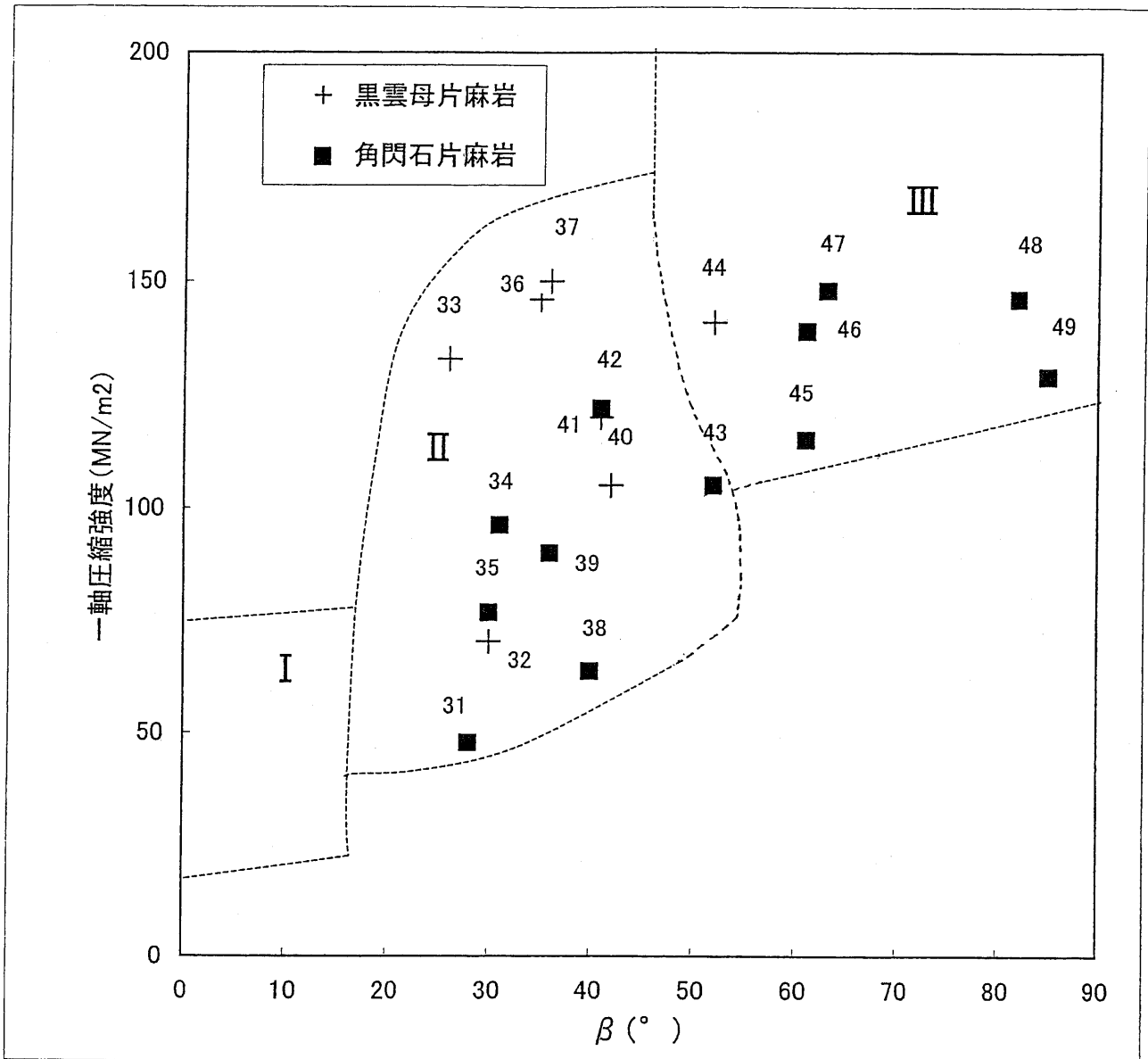


図-13 多様な程度にカタクレーサイト化した角閃石片麻岩 (+) と黒雲母片麻岩 (黒四角) の一軸圧縮強度- β 図。31~49: 試料番号 (表-1)。

Fig.13 Uniaxial compressive strength - β diagram for variously cataclastically deformed hornblende gneiss (solid squares) and biotite gneiss (+). 31~49: specimen numbers (Table 1).

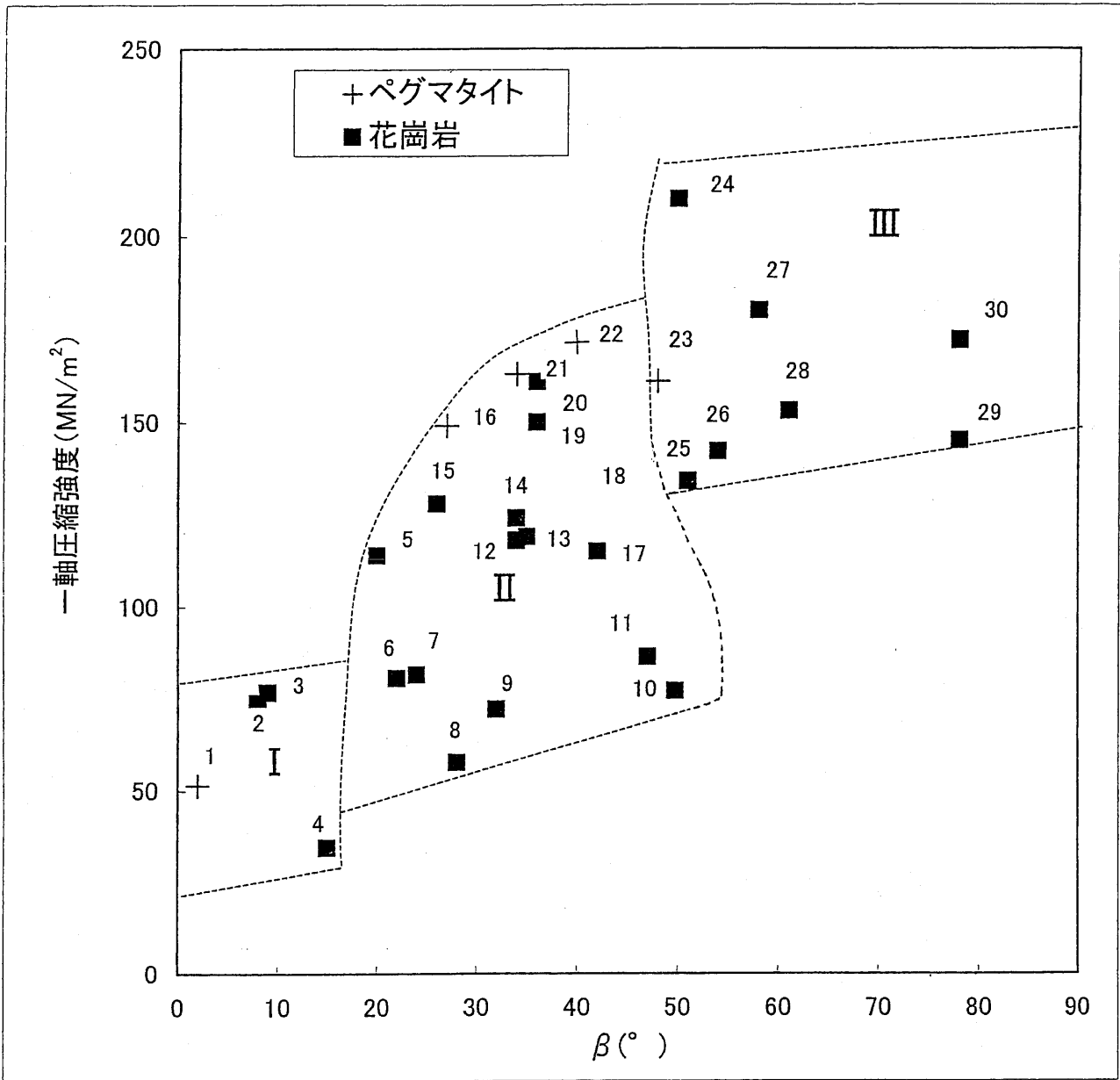


図-14 多様な程度にカタクレ-サイト化した花崗岩 (黒四角) とペグマタイト (+) の一軸圧縮強度- β 図。1~30: 試料番号 (表-1)。

Fig.14 Uniaxial compressive strength - β diagram for variously cataclastically deformed granite (solid squares) and pegmatite (+). 1~30: specimen numbers (Table 1).

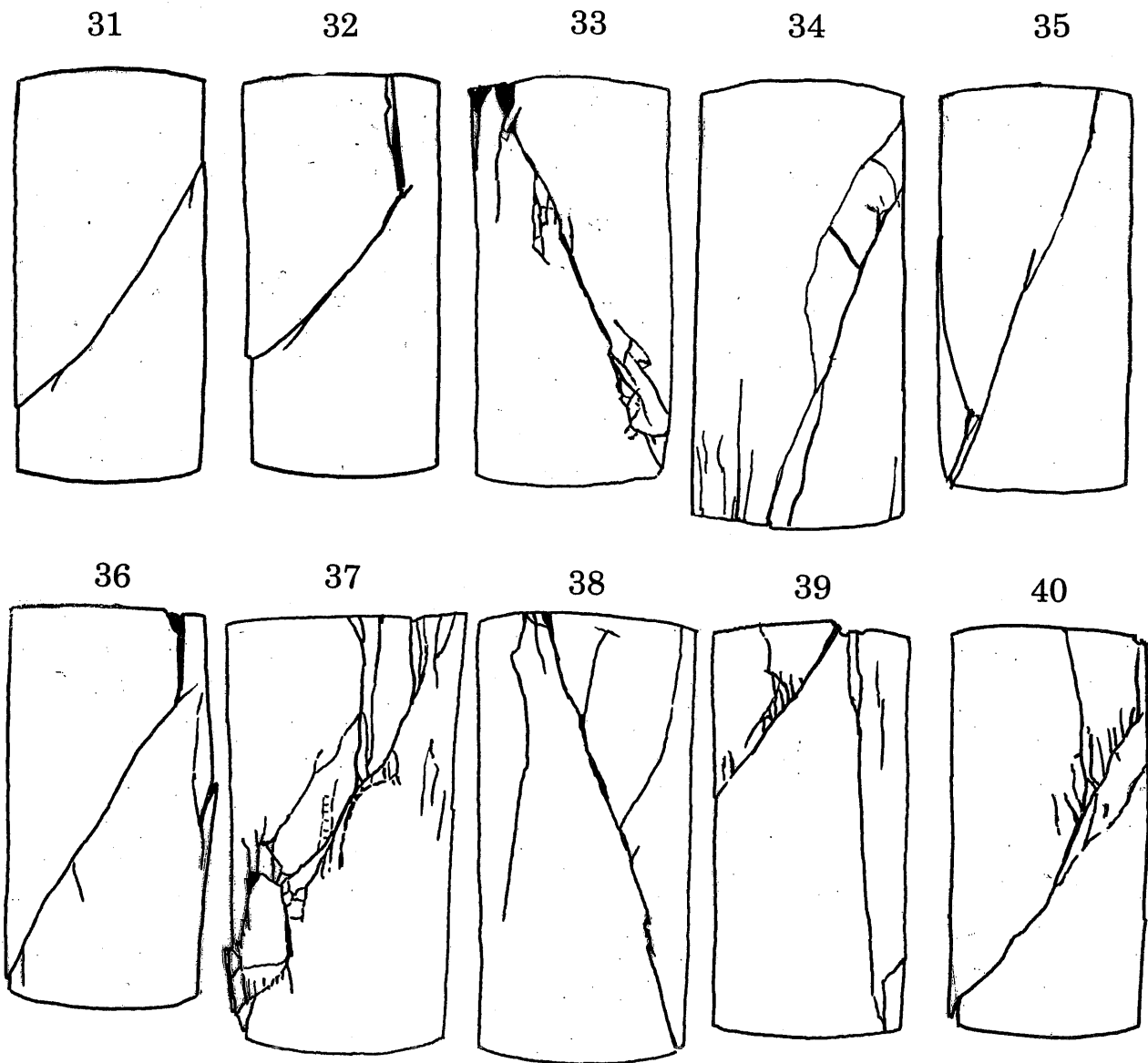
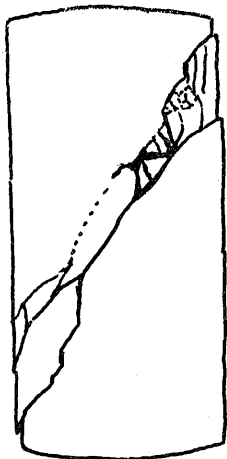


図-15 一軸圧縮試験により変形した片麻岩試料で肉眼で観察されるクラックのスケッチ。31~49: 試料番号。

Fig.15 Sketch of cracks observed under naked eyes on the specimens of gneisses experimentally deformed under uniaxial compressive condition. 31~49: specimen numbers.

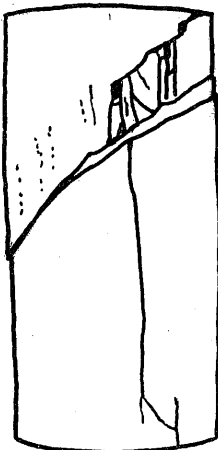
41



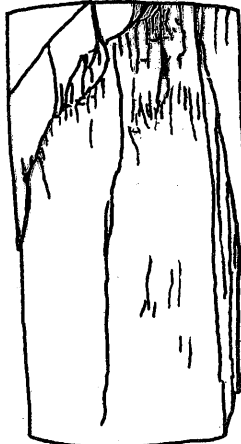
42



43



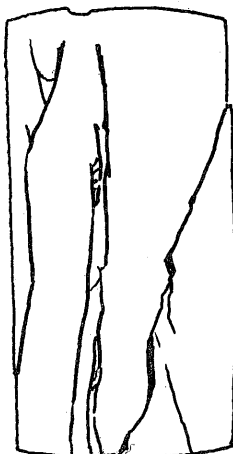
44



45



46



47



48



49





図-16 一軸圧縮試験により変形した片麻岩（試料31）に形成されたクラック周辺の顕微鏡写真。クラックの母岩はカタクレーサイト化した黒雲母片麻岩とそれを取り巻く弱くカタクレーサイト化した角閃石片麻岩。クラック：一軸圧縮試験によって形成されたシアクラック（変位量=約0.3mm：左横ずれ剪断），ho：普通角閃石。

Fig.16 Microphotograph around a shear crack in gneiss (specimen 31) experimentally produced under unconfined compressive condition. The host rock of the shear crack is cataclastically deformed biotite gneiss and its surroundings are hornblende gneiss only weakly cataclastically deformed. クラック：shear crack produced by uniaxial compression test (displacement magnitude = ca.0.3mm : left-lateral shear), ho : hornblende.

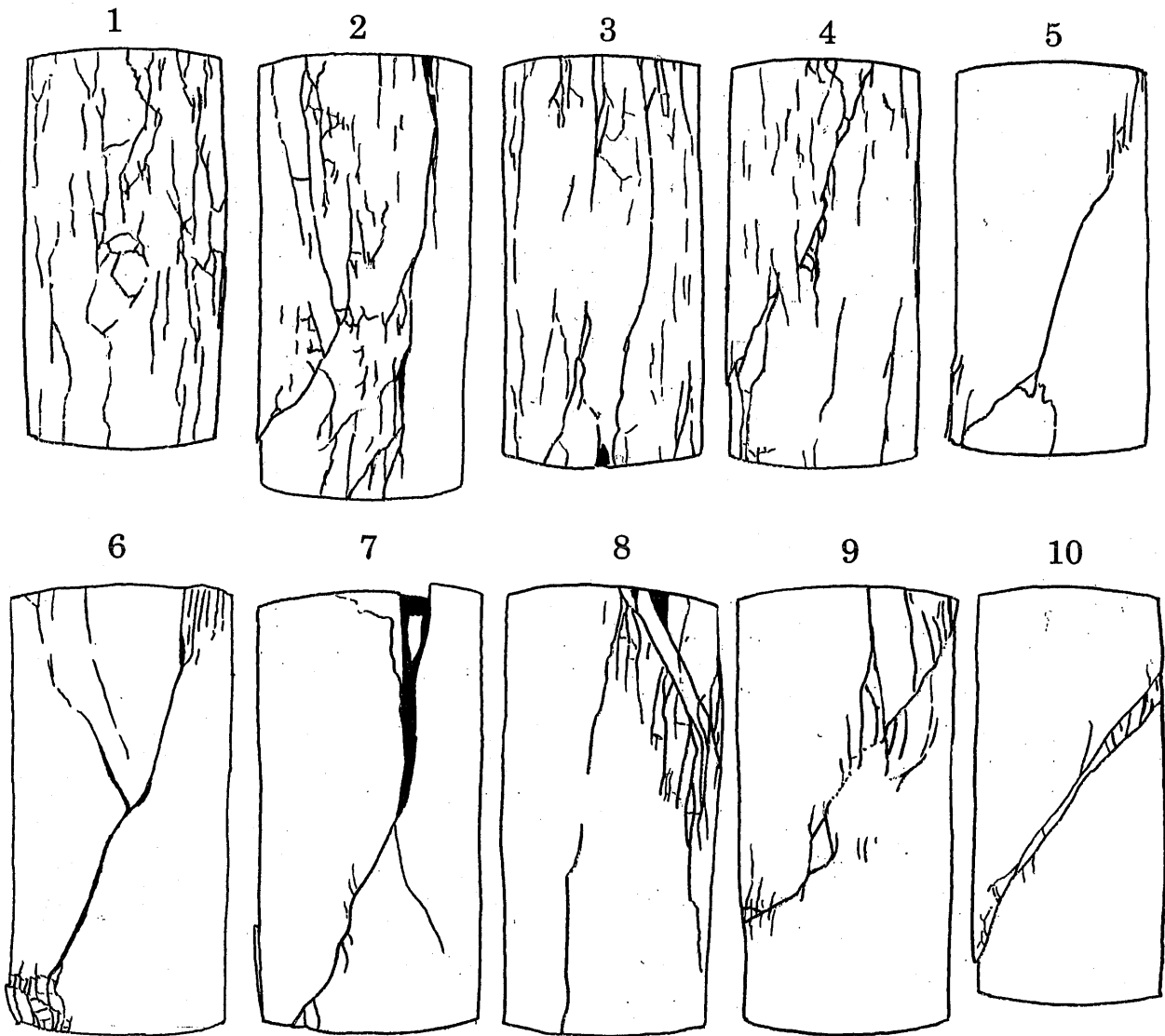
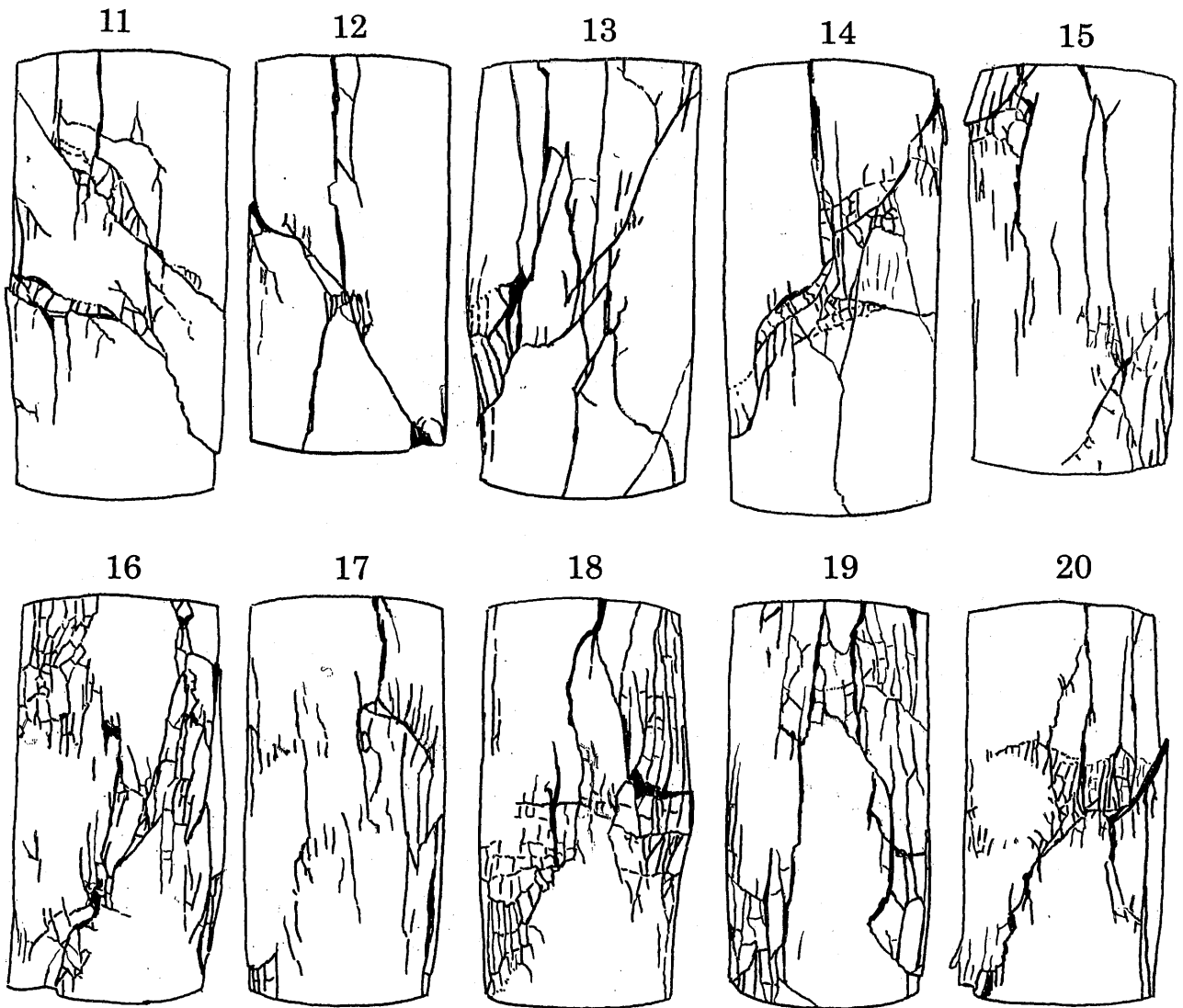


図-17 一軸圧縮試験により変形した花崗岩とペグマタイト試料で肉眼で観察されるクラックのスケッチ。1～30：試料番号。

Fig.17 Sketch of cracks observed under naked eyes on the specimens of granite and pegmatite experimentally deformed under uniaxial compressive condition.

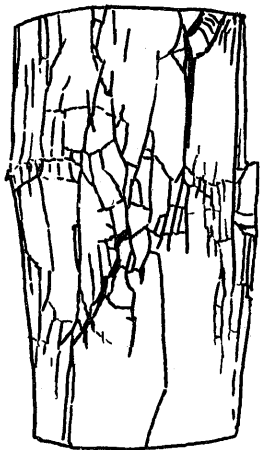
1～30：specimen numbers.



21



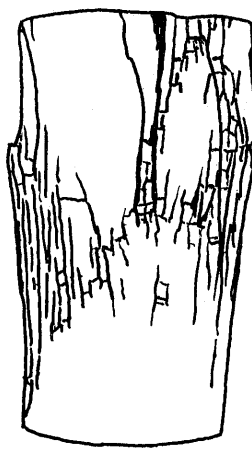
22



23



24



25



26



27



28



29



30



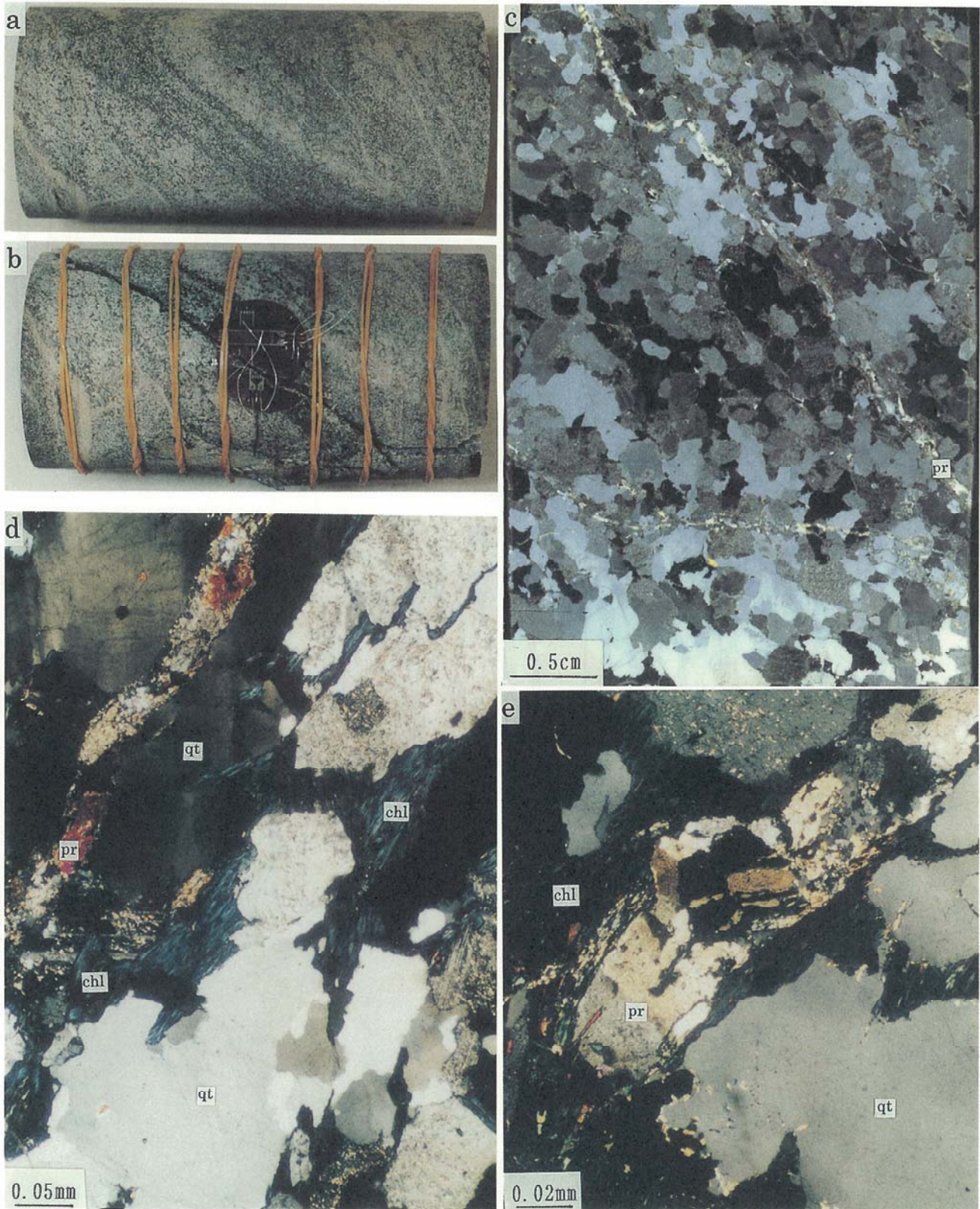


図-18 一軸圧縮試験に使用した黒雲母片麻岩試料 (36) ; a : 試験前, b : 試験後。カタクレ-サイト化をほとんど受けていない。c : 試料36に接した黒雲母片麻岩の顕微鏡写真。微細なぶどう石-緑泥石脈を含むがカタクレ-サイト化は極めて弱い。dとe : ぶどう石-緑泥石脈とその周囲の石英に見られる変形組織。

Fig.18 Biotite gneiss specimen (36) for uniaxial compressive test (a: before experiment, b: after experiment). The gneiss is scarcely cataclastically deformed. d and e: microphotographs of biotite gneiss in just contact with the specimen 36, in which prehnite-chlorite veins and quite weak cataclastic textures in their surrounding quartz grains are found.

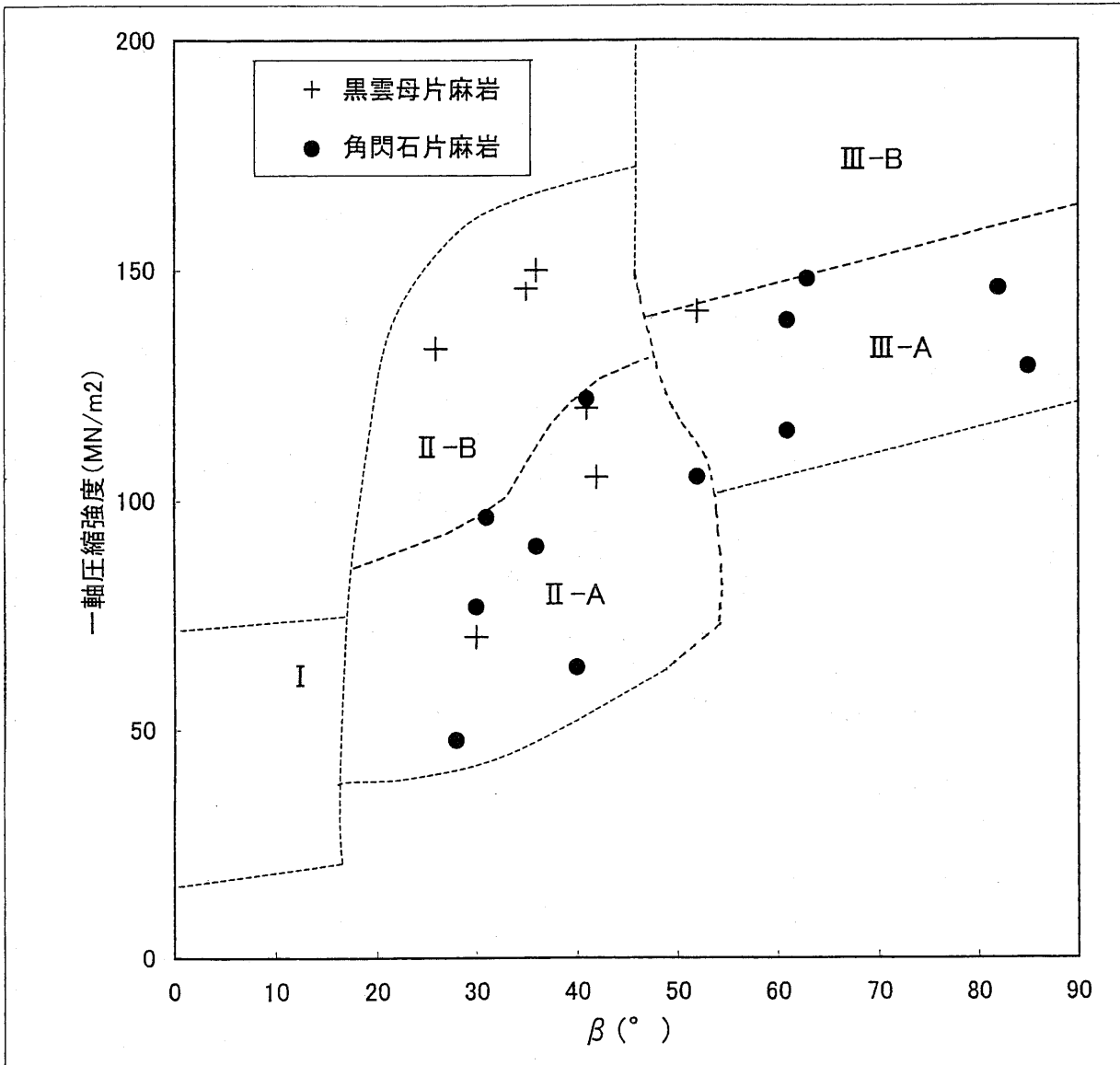


図-19 試験試料のカタクレーサイト化の程度による角閃石片麻岩 (黒丸) と黒雲母片麻岩 (+) の一軸圧縮強度- β 図の領域区分。詳細は本文。

Fig.19 Domain division of the uniaxial compressive strength - β diagram for hornblende gneiss (solid circles) and biotite gneiss (+) based on cataclasis degree of the specimens. For fuller explanation see the Text.

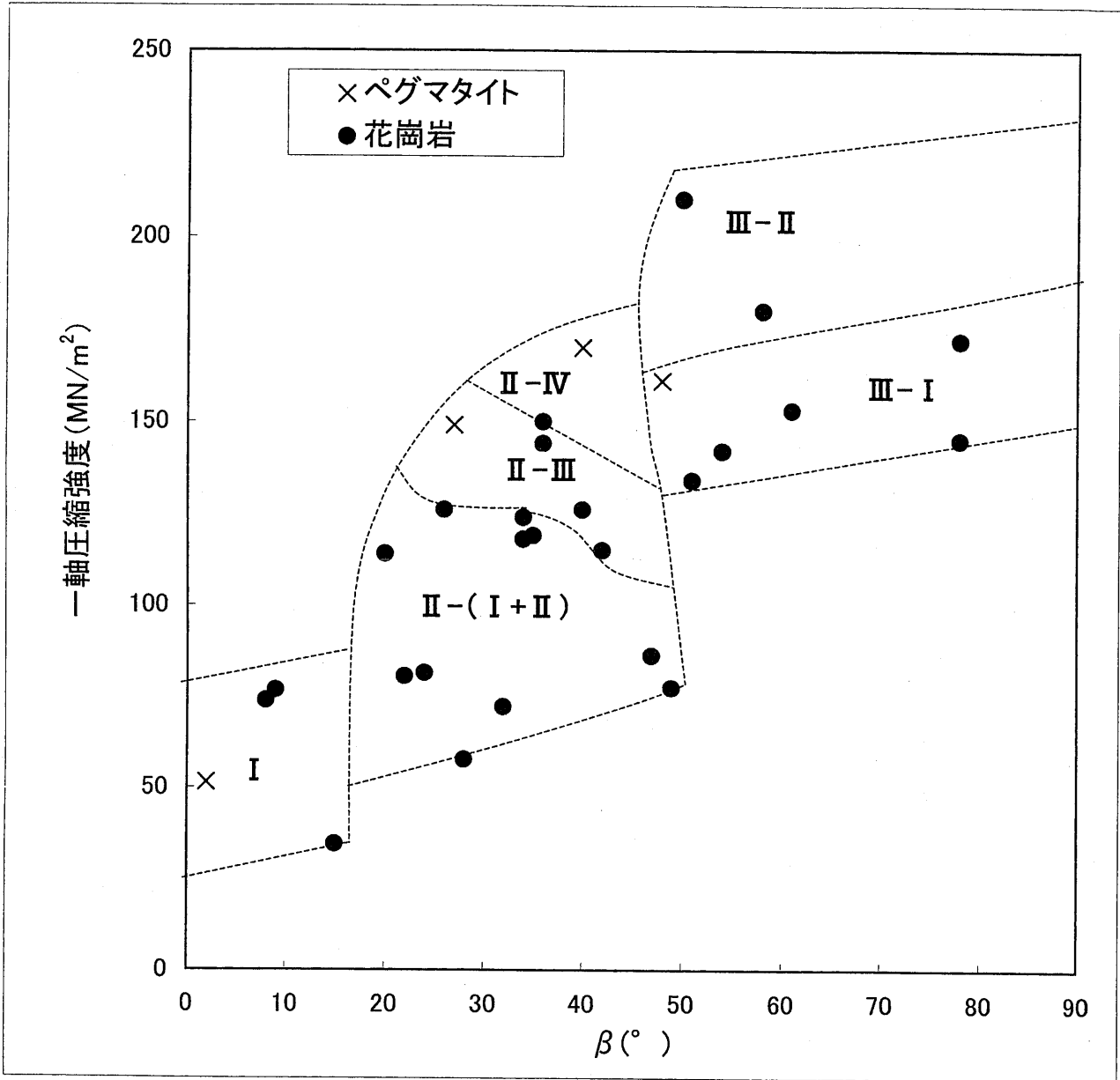


図-20 実験変形試料に肉眼で観察されるクラックの特徴による花崗岩(黒丸), ペグマタイト(×)の一軸圧縮強度- β 図の領域区分。詳細は本文。

Fig.20 Domain division of the uniaxial compressive strength - β diagram for granite and pegmatite based on characteristics of cracks observed under naked eyes on the experimentally deformed specimens. For fuller explanation see the Text.