

弾性波 CT でみた岩石の断層形成過程

THE OBSERVATION OF FAULTING PROCESS IN ROCK
BY COMPUTER TOMOGRAPHY

柳谷 俊*・山田浩陽**・寺田 孚***

By Takashi YANAGIDANI, Hiroaki YAMADA and Makoto TERADA

Seismic CT was employed to observe how dilatancy of rock localizes before faulting. The seismic CT can map the spatial distribution of P wave velocities. Since P wave velocity is determined by the extent of dilatancy (density, orientation, and aspect ratio of microcracks), mapping the seismic profile is useful for observing nondestructively the progressive development of dilatancy. The specimen of Ohshima granite was compressed at a constant deformation rate under uniaxial stress. The reconstructions were made within the plane perpendicular to the loading axis. The maps clearly show the metamorphic changes of dilatancy before faulting; at first the formation of diffuse dilatancy occurred, the localization of dilatancy to a few near-surface areas followed at the next stage, and finally a failure zone appeared intersections of localized dilatant areas.

Keywords: dilatancy, computer tomography, ultrasonic CT, localization, faulting

1. イントロダクション

われわれは、“弾性波 CT による岩石のダイレイタンスー局所化の観察¹⁾” (以下、論文 1 とよぶ) において、岩石のダイレイタンスーが、応力-ひずみ曲線の最大耐荷重 (破壊強度) 点近くで、どのように局所化しているのかを調べるために、載荷後の試料断面の P 波速度の分布を再構成した。ここで採用したテクニックは、弾性波 CT とよばれる方法である。この方法では、まず、観察したい面内の多数のパスで P 波速度を測定し、次に、計算によって P 波速度の分布を得る。P 波速度はダイレイタンスーの発達に応じて変化するので、弾性波 CT はダイレイタンスーの局所化を非破壊的にマップするために、大変有効な方法である。さらに、この方法の優れた特徴は、弾性波速度の分布が得られるので、異なる条件で観察された結果の定量的な比較が可能である。論文 1 では大島花崗岩の円柱形試料が用いられ、載荷軸に平行な断面内での P 波速度の分布が再構成された。

ここでは、試料から発生する AE レートが一定になるよう油圧を上げ下げして、マイクロクラックの発生をコントロールし、最大耐荷重点到達直後の爆発的な破壊を避け、その後、除荷して、弾性波 CT を試みた。したがって、この試料には、断層が形成される直前のダイレイタンスー (マイクロクラック) の空間的分布が維持されていると考えられる。再構成の結果、ダイレイタンスーの発達・局所化のパターンが、マクロ的な破壊モード (一軸圧縮下の大島花崗岩では共役断層) を決めることが明らかになった。

さらに、われわれは、“弾性波 CT による岩石内を浸潤する水の観察²⁾” (論文 2) において、乾燥した花崗岩の中へ水が浸潤してゆく過程を可視化して観察した。2つの断面で、P 波速度と減衰係数の分布 (Seismic profiles) が再構成された。弾性波 CT によって、連結しているマイクロクラックを通して流れてゆく水の様相を観察することができた。ここでは、岩石においてしばしば観察される P 波速度の異方性を、弾性波 CT のアルゴリズムの中に組み込んで補正した。この結果、異方性を考慮・補正しないで再構成した場合に起こる偽像の発生を避けることができた。

われわれは、上に述べた研究をさらに発展させ、弾性波 CT という新しい Tool を、われわれの目標の 1 つで

* 工修 京都大学助手 工学部資源工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 工修 石油資源開発(株)
(〒107 港区赤坂 2-17-2)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部資源工学科
(〒606 京都市左京区吉田本町)

ある岩石試料に発生する断層の形成プロセスの観察に使用した。圧縮応力のもとで、岩石がどのようにして破壊（断層またはせん断破壊の形成：Faulting）に至るかを正確に理解することは、いつの時代においても、古くて新しい岩石・岩盤力学の重要なテーマである。この問題を解決するために、まず、一軸下で変位速度一定圧縮試験を行い、載荷軸に直交する断面でのP波速度の分布を、非破壊的に、破壊に至るまで連続して観測することを試みた。その結果、岩石試料のFaultingに至るプロセスを可視化することができたので報告する。

2. 実験の概要

(1) 弾性波CTに使用した岩石試料

弾性波CTの実験に使用する岩石試料として大島花崗岩を選択した。一般に、花崗岩の、P波速度³⁾、ヤング率⁴⁾、強度⁵⁾、ダイレイタンスの発達^{6)~8)}、Linear compressibility⁷⁾は等方・均一ではなく、方向によって物性が変化する。この異方性は、マイクロクラックの配向(Fabric：岩の目)に起因し、斜方晶系(Orthorhombic：互いに直交する対称面をもち、単位格子 a , b , c が $a \neq b$, $b \neq c$, $c \neq a$ である結晶系)とみなし得るような異方性をもつ^{9)~13)}。マイクロクラックの配向は、岩石が生成してから後に作用した異方的な応力によって生じると考えられている。たとえば、Jahn¹⁴⁾は、侵食によってオーバーバーデンが取り除かれるために、花崗岩の中では水平面内で、他の面より卓越してマイクロクラックが発達・伸展すると説明している。アメリカ合州国では、強い配向を示す面から順に、Rift plane, Grain plane, Hardway plane とよばれている。このような配向に起因して、ある断面内でのP波速度の方向による分布(Azimuthal variation)は複雑になる。マイクロクラックが配向する岩石を、結晶と等価な異方弾性体と仮定すると^{15), 16)}、任意の断面内でのP波速度のAzimuthal variationは、理論的には楕円ではない^{17), 18)}。しかし、われわれの経験の範囲では、花崗岩のP波速度の異方性を、任意の断面内で測定してみると、その分布は楕円で十分精度よく近似できる¹³⁾。花崗岩では、Rift planeに直交する方向が最少主P波速度の方向になる。弾性波探査の場合においても、異方弾性体の非球面の波面は、しばしば回転楕円体で近似され、このような取扱いの合理性が広く認められている¹⁹⁾。

すでに述べたように、花崗岩には異方性があるので、実験を行うにあたって、試料の方向をコントロール（または識別）することは重要である。さらに、弾性波CTでは、観察したい断面内で弾性波の伝播走時を多数測定し、次に、計算によって弾性波速度の分布を得る。この際、P波速度の異方性が大きければ、その影響・効果

を補正・処理せずに再構成を計算すれば、偽像が現われる。したがって、異方性がどのような分布と大きさをもつか、把握することは重要である。

われわれは、以上の点を考慮して、花崗岩試料を作成するにあたって、少なくとも Rift plane を試料作成前に識別し、Rift plane に直交かまたは平行にコアを採取して試料を作成している。方向のコントロールを行わなければ、実験は、単にばらつきを測定しただけという結果に終ることが多く、実験結果の定量的比較は困難である。

次に、試料の方向のコントロール法の詳細を述べる。まず、元の大きなブロックから互いに直交する3方向に予備的なコアリングを行い、P波速度分布の測定(3D- V_p ：3-Dimensional V_p measurements)を行う。花崗岩の場合には、どの石切場においても、岩の目を利用して石の切り出しをしているので、直方体の試料を購入すると、いずれかの面は Rift plane であることが多い。さらに付け加えるなら、Rift plane の肉眼による識別は、慣れれば比較的簡単である。

Fig. 1 に、乾燥した大島花崗岩の3D- V_p とP波速度

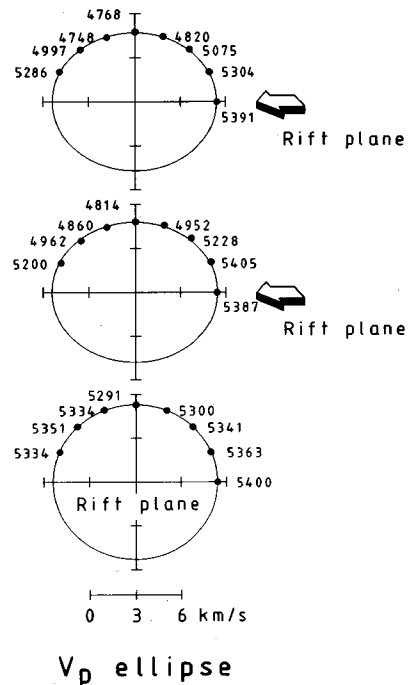


Fig. 1 The azimuthal distributions of V_p in Ohshima granite at $\pi/4$ increments within three mutually perpendicular planes. V_p ellipses were constructed by using the least squares method. The specimen was cored perpendicular to the rift plane, which was determined based on this measurements. The lower ellipse shows the anisotropy of V_p in the plane of reconstruction.

楕円を示す。測定値 (●で表示) の P 波速度楕円への Fitting には, Nye²⁰⁾の方法 (最小二乗法) を用いた。P 波速度楕円から測定値のばらつきは ± 0.01 km/s (測定精度) 以内である。3つの楕円から, 大島花崗岩の P 波速度分布は, Orthorhombic な対称性をもっていることがわかる。この結果から, 主 P 波速度を求めると, $V_{p1}=4.70\sim 4.78$ km/s, $V_{p2}=5.29\sim 5.37$ km/s, $V_{p3}=5.39\sim 5.42$ km/s である。P 波速度の異方性が最も弱い面 (Rift plane と考えられる) は, 図の下段の測定断面であることがわかる ($V_{pmax}/V_{pmin}=1.03$)。この断面が再構成断面になるように, すなわち, Fig. 1 の下段の P 波速度の分布が再構成断面に現われるように (Rift plane に垂直に) コアーを抜いた。

試料は, 直径 80 mm, 高さ 200 mm の正 32 角柱に整形した。両端面の平行度は ± 0.005 mm 以内である。正 32 角柱に整形した理由は, トランスデューサーを試料にしっかり接着するためである。この研究では, 扇形のスキャン(ファン・ビーム: Fan beam)方式を採用した。その形 (あとで述べる再構成のための画素, トランスデューサーも同時に図示) を Fig. 2 に示す。P 波の送波と受波のための超音波トランスデューサーとして, 縦 10 mm, 横 4 mm, 厚み方向の共振周波数が 1 MHz の角板型圧電磁器振動子 (村田製作所(株)製: PZT-7:7 R-4-10-1000 BA) を選択した。試料の中央断面を再構成することとし, 中央断面の周りに 32 個のトランスデューサーを接着した。パス (①→⑰) と, この断面内の V_p 楕円の長軸 (V_{pmax} 軸) とのなす角度は 107° である。

さらに, 再構成断面の 15 mm 上で, 周方向ひずみを測定するために, 1 側面おきに 16 枚のひずみゲージ (ゲージ長: 4 mm) を接着した。また, スキャン断面よ

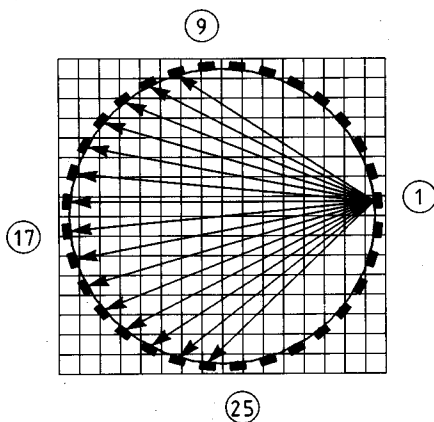


Fig. 2 Straight ray path linking of transmitters to receivers of the fan beam scan is shown. A single transmitter has fifteen receivers. The number of scanning paths was 240. A set of rectangular pixels that overlays the cross-sectional area is also shown.

り上下 40 mm 離して, 载荷軸方向ひずみを測定するためのひずみゲージ (ゲージ長: 8 mm) を, 90° ごとに 4 枚接着した。なお, 実験に先立って, 試料を約 2 か月間, 室内に放置して自然乾燥させた。

(2) 弾性波 CT の概要

この研究で用いた弾性波 CT のハードウェアとソフトウェア (再構成アルゴリズム: SIRT) は, 論文 2 で報告したものと同じである。異方性の最も弱い面を再構成したが, P 波速度の補正を必要とする場合があった。異方性の補正も, 論文 2 で提案した 2 つの方法を試みた。1 つは, 破壊が進展しても, 各画素ごとに (ミクロ的に) P 波速度の楕円性が成立することを仮定して補正する方法である。すなわち, 見掛けの等方性が得られるように, 速度“楕円”を速度“円”に変換する操作 (補正) を, 各画素ごとに行ったのちに再構成を計算する。求められた P 波速度は, おのおのの画素の V_{pmax} 軸方向の P 波速度と解釈する。

もう 1 つの方法は, 異方性を無視して再構成を行い, 差をとる方法である。すなわち, P 波速度の変化の分布を知ることができれば, ダイレイタンスの局所化を観察できると考え, まず, 異方性を補正せずに観察したい段階ごとに再構成を計算し, 0 MPa での P 波速度の分布を基準にその変化 (V_p/V_{p0}) の分布を得る方法である。ここでは, 両者を採用して, 結果を比較・検討することにする。

(3) 変位速度一定一軸圧縮試験

大島花崗岩試料は, 一軸下で, 変位速度一定 (ストレイン・レートに換算すると, $1.4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$) で圧縮された。試験には油圧式サーボ試験機を用いた。一軸圧縮試験, ならびに弾性波 CT のための P 波速度の測定のセッティングを Fig. 3 に示す。試料の上下にエンド・ピースが挿入されている。エンド・ピースは, 均一な载荷を実現するための工夫の 1 つである。試料に不均一な荷重がかかり, 試料が“片当たり”したり, 端面拘束が大きい場合には, 試料の中は不均一な応力場 (ひずみ場) が形成される。それに起因して, 载荷のごく初期の段階から, マイクロクラックは両端面付近, または側面の一部に集中する⁸⁾。このような場合には, われわれの研究目的を達成することができない。エンド・ピースの形状は, 直径が試料直径より 2 mm 大きく, 長さは試料長の 1/2 である。鋼鉄製 (SNCM 8) で焼き入れされている。この载荷方法を採用すれば, 端面拘束が軽減され, 試料は比較的均一に载荷されることが明らかにされている^{21), 22), 8)}。さらに, 载荷に際しては, わずかな荷重を前もってかけ, 载荷軸方向ひずみの分布を測定して均一な载荷が得られているかどうかをチェックした。

弾性波 CT のスキャンとひずみ測定は, 試験を始め

てから 183 MPa までは 1 時間ごと、それ以後は 10 分ごとに行った。あとで述べるように、この研究では、試料を回収して染色し、再構成の結果と比較・対照することも研究目的の 1 つである。したがって、爆発的な破壊が起き、試料が破碎されてしまうのを避けるため Faulting 直前に除荷することにした。過去の研究で、Faulting に先立って、AE (アコースティック・エミッション) が加速度的に増加することや、それに伴って、ストレス・ドロップが生じることがわかっているため、それらの現象をモニターし、前兆が観察されると即座に除荷することにした。この実験では、189 MPa に達したとき試験を終えた。

3. 実験結果

(1) 応力-ひずみ関係

Fig. 4 に、応力-ひずみ関係を示す。载荷軸方向ひずみは 8 か所、周方向ひずみは 16 か所の平均値である。体積ひずみは、平均载荷軸方向ひずみと平均周方向ひずみを用いて求めた。Fig. 5 に、载荷軸方向ひずみ (圧縮を正) を同心 4 角形、周方向ひずみを同心 16 角形 (ローズ・ダイヤグラム) で示す。以下で示す図においては、結果の比較を容易にするため、座標軸の方向が統一されている。コンターは、内側より 52, 75, 102, 127, 152, 164, 173, 183, 189 MPa でのひずみ分布を表わす。この表示法は、均一な载荷が行われたかどうか、ひずみ分

布に楕円性 (異方性) が現われるかどうか、自己相似性 (初期の分布形状との相似性) がどの時期に失われるか、を知るのに適している。

载荷軸方向のひずみ分布から、その分布形状は载荷のごく初期に形成され、大きさを変えるだけで、破壊に至るまで相似性を保持していることがわかる。このことは、载荷が均一に行われたことを意味する。一方、周方向ひずみは、载荷の初期には、楕円で近似できるような分布をしている。試料のダイレイタンスーが進むと、徐々に楕円性と自己相似性を喪失する。すなわち、164 MPa (強度の約 85%) あたりから、ダイレイタンスーの局所化が進み始めていることがわかる。

(2) 弾性波 CT による P 波速度分布の再構成

Fig. 6 に、試料の中心を通る代表的なパス (①→⑭) の P 波伝播波形の、応力の増加に伴う変化を示す。花崗岩に一軸圧縮応力を作用させると、まず、载荷軸に直交するマイクロクラックが閉じて、P 波速度は増加する。次に、圧縮応力が強度の 1/3~1/2 をこえてダイレイタンスーが始まると P 波速度は低下する。このことは、载荷軸に平行方向に、先在するマイクロクラックが伸展したり、マイクロクラックが新たに発生することに起因する。この変化をもとに、どの応力レベルで再構成を行うかを決定した。

次に、①を中心にしたファン・ビーム (受波は⑩~⑳) での P 波伝播波形の変化を、Fig. 7 に示す。この図では、

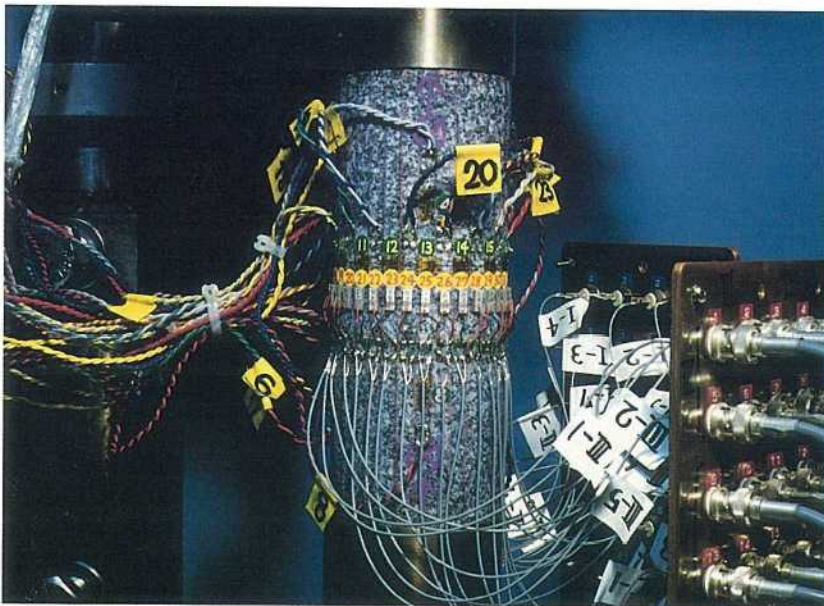


Fig. 3 A diagram of the Ohshima granite specimen used in this study. The regular polygonal prisms with thirty-two faces was cut to install the transducers tightly. Thirty-two PZT-7 elements are used. Eight axial, and sixteen circumferential strain gauges were glued.

0 MPa の初動の半波長分と 182 MPa での波形を重ね合わせて表示されている。ダイレイタンスの発達に伴い、P 波速度が低下し、初動振幅が減衰する。また、高周波成分が減少し、卓越する周波数が低い方へシフトする。

さて次に、マイクロクラックが伸展・集積するに従い、マクロ的な P 波速度の異方性がどのように変化するかをみてみよう。Fig. 8 に P 波速度楕円の変化を示す。実線が座標軸、破線は楕円分布を仮定して V_{pmax} と V_{pmin} 、およびその方向を求めたものである。図から明らかなように、164 MPa までは、 V_{pmax} と V_{pmin} 軸の方向は変化していない。それ以後では、主 P 波速度軸の回転がみられるが、これらは異方性の方向が回転したというより、ダイレイタンスの局所化が起こったことに起因すると考えられる。この考えは、P 波速度の分布の楕円への Fitting が悪くなるということからも支持される。

Fig. 9 に、P 波速度の異方性補正を行った再構成の結果を示す。ダイレイタンスが始まるまでは、P 波速度の分布は均一で、応力の増加とともに P 波速度は増加している。ダイレイタンスが始まると、マイクロクラックの閉塞による P 波速度の増加と、マイクロクラックの伸展や新たな発生による速度の減少は平衡している。127 MPa あたりまでは、P 波速度の分布は均一である。よく観察すると、164 MPa 以後の変化パターンは、152 MPa のときから徐々に形成されつつある。164 MPa 以後の変化は急激かつ顕著である。P 波速度の減少は断面全体で進むが、ダイレイタンスの局所化も急激に進行する。164~189 MPa では、試料全体にわたって P 波速度は大きく減少するが、マイクロクラックが集中した低速度領域が試料の中心を取り囲むように周縁部に形成されて、応力が増加するのに従い厚くなってゆくことがわかる。破壊の直前には、向かって右半分のダイレイタンスの発達が顕著である。なかでも、マイクロクラックが強く集中している領域が側面近くの数か所

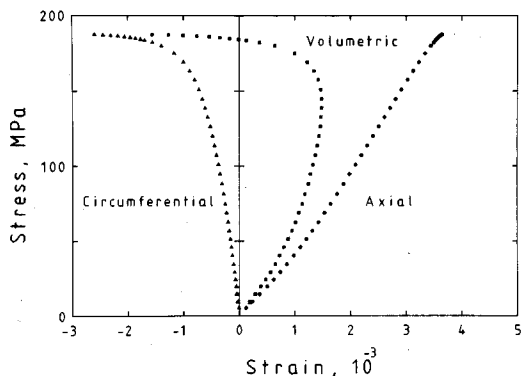


Fig. 4 The relations of stress versus average strains during uniaxial compression. Strain rate was $1.4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

で形成されていることが、P 波速度の低下が著しい画素の存在から明らかである。189 MPa では、低速度領域がつながり、断層面が形成されつつあることがはっきりと観察できる。

V_p/V_{p0} の再構成結果を Fig. 10 に示す。補正した P 波速度の再構成結果との一致は良好である。どちらの再構成によっても、特に、P 波速度が最も低下した画素の位置は、側面付近の北北東部、北東部、南東部（上を北とする）であった。周方向ひずみが急速に増加した方

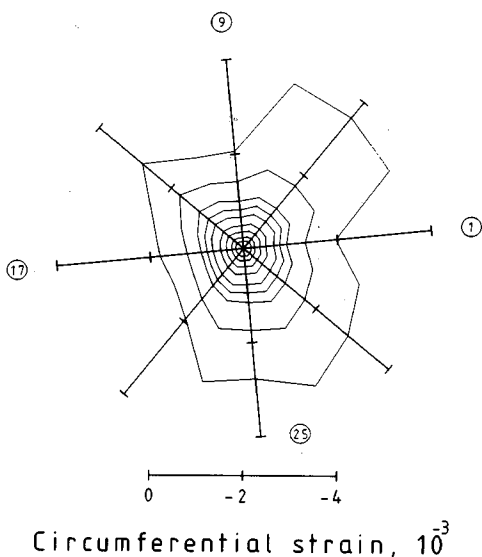
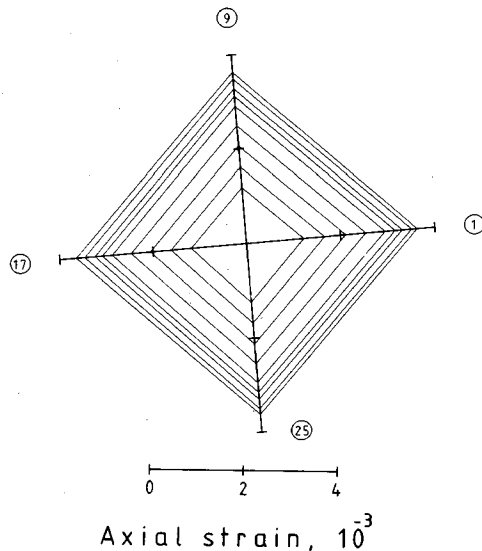


Fig. 5 Axial and circumferential strain diagram. The stress levels of contour lines are, 52, 75, 102, 127, 152, 164, 173, 183, 189 MPa, respectively, from the inner contour.

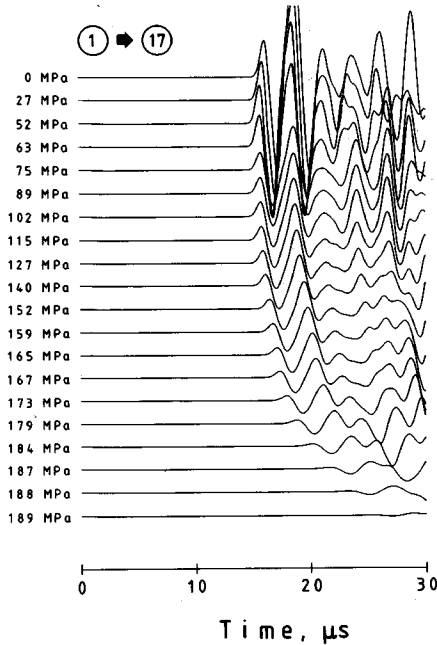


Fig. 6 The changes of P wave propagating from ① to ⑰ at different stress levels.

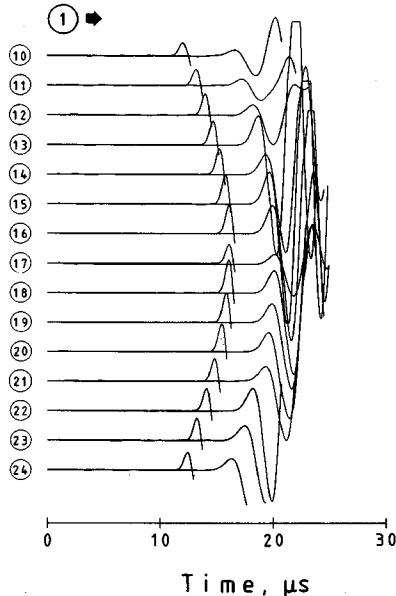


Fig. 7 The waveforms at various receivers of fan beam at 0 MPa and 180 MPa. The first peaks at 0 MPa are superposed on the full traces at 180 MPa.

向ともよく一致している。Fabric とダイレイタンスーが局所化した方向の間には、相関は観察されなかった。

V_p/V_{p0} を再構成するにあたっては、異方性を補正しないままで各応力レベルで再構成を求めている。152

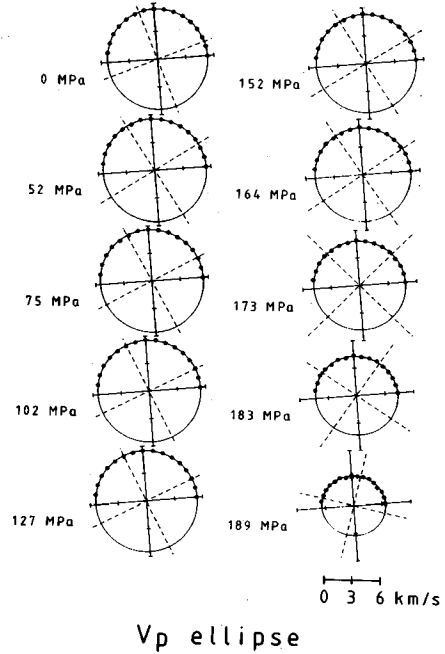


Fig. 8 Magnitude and orientation of V_p ellipses at different stress levels.

MPaまでの再構成には異方性に起因する偽像ははっきりと観察されたが、P波速度のコントラストがはっきりする、164 MPaをこえると、異方性に起因する偽像はバックグラウンドの中に埋もれてしまい、もはや観測されなかった。

(3) 弾性波 CT による P 波速度の再構成結果と染色切断法による結果との対比

すでに述べたように、試料が破壊する直前に、試料を無傷で除荷・回収することができた。回収した試料を染色して、再構成の結果と比較・対照した。まず、試料からひずみゲージ、端子、PZT-7 トランスデューサーを取り除き、染色探傷剤(特殊塗料(株)製スーパー・チェック)で染色した。その後、再構成を行った断面に沿って切断し、写真を撮影した。Fig. 11 は、試料表面に探傷剤を約 10 分間吹き付けた後の切断写真である。サイコロの 1 の目が、超音波トランスデューサー番号①を表わす。試料表面付近でマイクロクラックの密度が高く相互に連結し、染色液がはやく浸透したと推定される領域は濃く染色されている。この結果は、周方向ひずみのマッピングの結果とよく一致している。再構成の結果とも、表面から染色剤のアクセス・パスが形成されている領域のみが染色されることを考慮すれば、両者の一致は良好であると考えられる。

次に、弾性波 CT の結果との比較・対照がさらに意味をもつように、切断面を再度染色し、即座に、5 mm

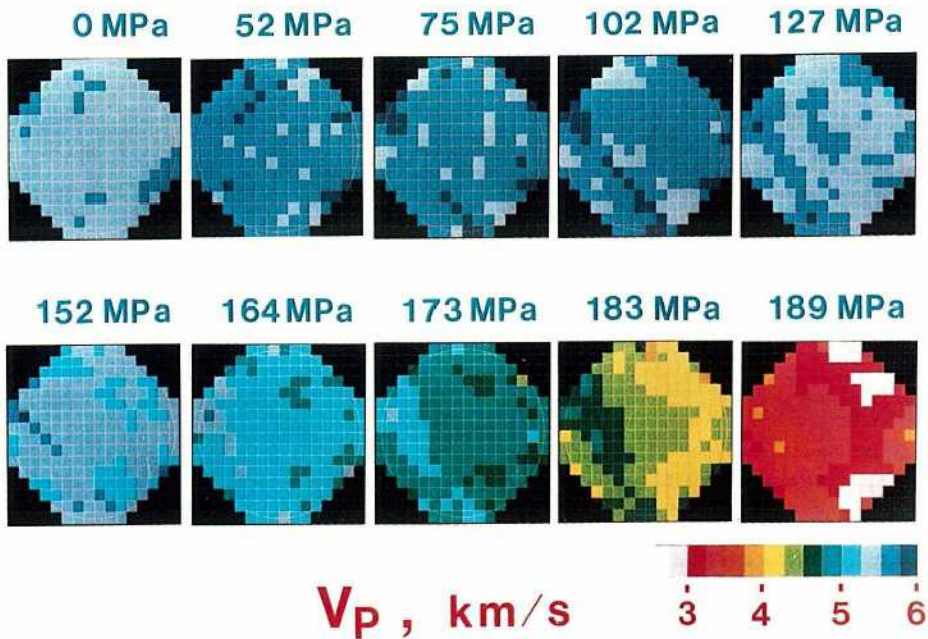


Fig.9 Reconstructions of V_p during the uniaxial compression. Anisotropy of P wave velocity is compensated based on the assumption that the elliptic distribution is maintained throughout loading.

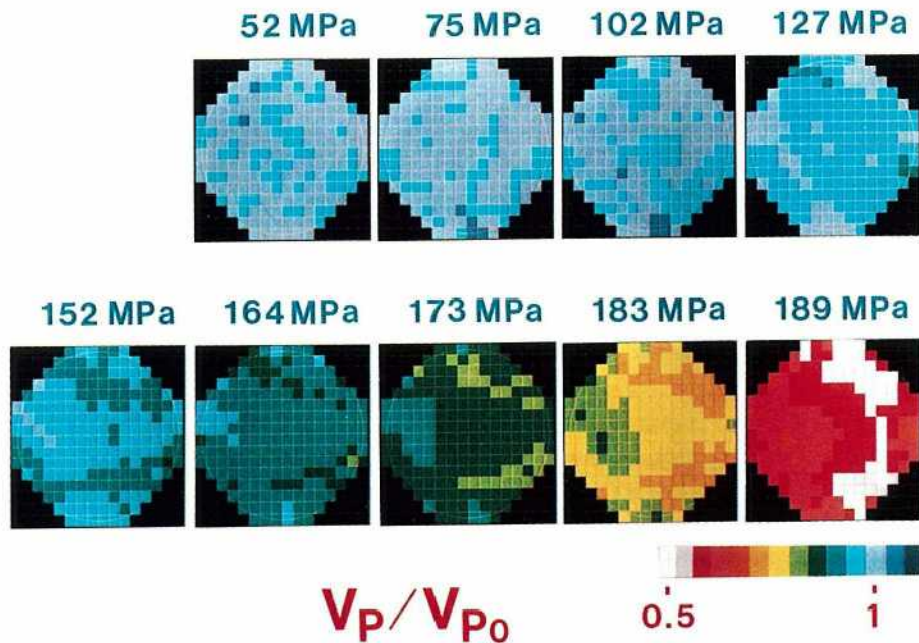


Fig.10 The reconstruction of V_p/V_{p0} during the uniaxial compression.

削り取って観察した。結果を Fig.12 に示す。染色方法が恣意的・定性的にもかかわらず、染色写真とよく一致した像を弾性波 CT は写し出していると結論できる。ただし、弾性波 CT で観察された断層面は、この写真ではそれほど明瞭ではなかった。

4. 討 論

(1) 弾性波 CT の再構成結果の検討

われわれは、花崗岩に特有な異方性（ここでは P 波速度）の補正処理に、断面内の P 波速度分布を楕円に

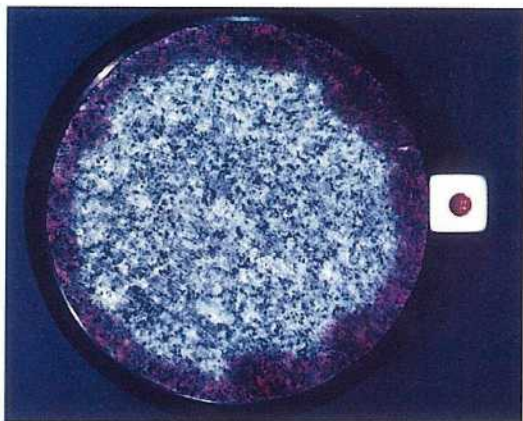


Fig. 11 The cross-sectional view of the specimen. The specimen was cast into a dye in five minutes, and was cut immediately along the plane of the reconstruction.

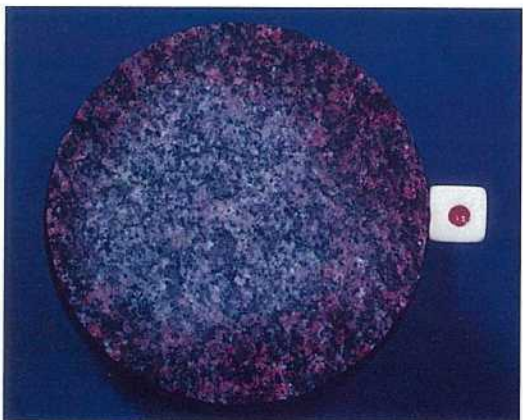


Fig. 12 The cross-sectional view of the specimen penetrated with dye. After the observation in Fig. 11, the specimen was again cast into dye following the same procedure, then 5 mm of the surface was removed.

近似した。すでに述べたように、この補正法のかくされた仮定は、マイクロクラッキングが進み、マクロ的なP波速度の分布が“楕円性”を喪失しても、ミクロ的には“楕円性”（正確にいうなら、楕円性、 V_{pmax}/V_{pmin} 、 V_{pmax} の方向）が維持されることを意味している。この仮定の是非については将来の研究をまたなければならない。極端な場合には、再構成が原理的に不可能な場合も考えられ、注意を要する。たとえば、もしマイクロクラックの面的な集中が起こると強い異方性が期待される。このような場合には、われわれの方法では補正が困難であり、画像はぼけてしまう。論文2に述べたように、異方性が適切に補正されないと、ファン・ビームを採用した場合には、誤差は相対する周縁部に系統的に集まる。したがって、弾性波CTによって観測された“マイクロ

クラックの試料側面付近への集中”は誤りである可能性がある。

しかし、断面の染色写真や、同時に測定した表面ひずみのマッピングとの一致は良好であり、弾性波CTによって示された表面へのマイクロクラックの集中は、異方性を補正しなかったことに起因する偽像ではないことを示唆している。さらに、異方性の補正法が異なる2つの再構成においても、同じ特徴をもった画像が得られている。以上の点を考慮すると、P波速度の異方性に対してわれわれが提案した補正・処理法は合理的で妥当であると結論できる。

次に、弾性波の特徴的な性質である屈折の効果について論じよう。再構成の結果から明らかになったように、152 MPaまではP波速度の分布に大きな構造的変化は生じていない。152 MPaよりあとでは、全体的にP波速度が低下するのと局所化するのが同時に起こっている。幸いにも、P波速度のコントラストは小さく、屈折は深刻な問題となっていないと考えられる。われわれのアプリケーションでは、メディカルな場合に要求されるほど細かい構造を再構成する必要はないので、画素とバスの数が少なくとも十分有効であると考えられる。

現在、屈折を考慮した再構成法として、波線追跡（または光線追跡：Ray tracing）が知られている。この方法では、まず、屈折を考慮しないで再構成を計算し、その結果を用いて、初等幾何学と屈折（Snell）の法則を画素の境界面ごとに適用することにより、波線の経路・行方を決定する。次に、P波の伝播時間を計算し、実測値と計算値の差が減少するように再構成結果を修正する。この手続きを繰り返して、最も実測値と合う再構成を求める。

しかし、この方法を採用するには2つの問題がある。1つはテクニックに関する問題である。われわれの再構成は波線追跡を採用できるほどの精度が得られていないし、画素の数も多くないという点である。たとえば、波線追跡では、画素の角に波線が少しかかるだけでも、著しく波線を曲げてしまう。波線追跡はレンズの設計に大きな効果をあげているが、われわれの場合とは条件が本質的に異なっている。

もう1つは理論的な問題である。Johnson et al.²³⁾とSchomberg²⁴⁾は、波線追跡法を弾性波CTに用いた。彼らは、屈折を考慮した再構成は、P波伝播パスを直線近似して得られた再構成から、反復計算によって得られるだろうと予想している。この予想が正しいかどうかは厳密には証明されていない。Schombergは、コンピューター・シミュレーションの結果、波線追跡を行うと画像が改善されたと、述べている。Johnson et al.²⁵⁾によっても同様な結論が得られている。しかしながら、シミュ

レーションに用いたデータも波線追跡法によって作成されており、彼らの結論を実際の場合に、直接、適用できない。したがって、波線追跡を CT のアルゴリズムに含めることが適切であるかどうかは、実験的検討を要する。すなわち、さまざまなファントム（模型構造物）を用いて、多くの実験を重ねる必要がある。以上の点を考慮してこの実験では、波線追跡を SIRT に含めなかった。屈折を考慮しないにもかかわらず、岩石のダイレイタンスの局所化を観察するには十分な精度が得られたと、われわれは考えている。

(2) ダイレイタンスの局所化について

論文1で、われわれは最大耐荷重点をこえて載荷し、その後、除荷した試料を用いて、ダイレイタンスの局所化の様相を再構成した。そこでは載荷軸断面の P 波速度の分布を求めた。その結果、Faulting が近づきつつある試料を輪切りにしたときに期待されるパターンと調和するような構造がすでに形成されていることが明らかになった。すなわち、岩石の不安定破壊が起こると、試料の中心部は粉碎されてしまうが、両端部には、ほぼ面対称のピラミッド形の試料片が破壊されずに残る。このような破壊パターンは、それに先立って形成されるダイレイタンスの局所化のパターンと一致している。

この研究で行った再構成では、再構成した断面の方向が異なり、また、強度点に至るまでを重点的に観察しているので、両者を、直接、比較できない。しかし、再構成断面の違いを考慮すれば、論文1でみつけられた“砂時計”のようなダイレイタンスの形成と、今回の結果は調和している。すなわち、“砂時計”を中心部で横に切断した場合を考えればよい。なぜなら、この研究で行った再構成は、載荷軸に直交する断面でのダイレイタンスの発達の模様をみているからである。

この研究では、広範なダイレイタンスが試料の周縁部に形成され、“砂時計のウエスト”はくびれてゆくことが明らかになった、と同時に、論文1での予想“カタストロフィーが接近してくると、局所化した領域の中に、将来の断層の核のようなマイクロクラックがさらに集中している領域が形成され、次にこれらがつながり合って Faulting に至る”が証明された。

参 考 文 献

- 柳谷 俊・寺田 孚：弾性波 CT による岩石のダイレイタンス局所化の観察，土木学会論文集，第 370 号/Ⅲ-5，pp. 159~168，1986。
- 柳谷 俊・山田浩陽・寺田 孚：弾性波 CT による岩石内を浸潤する水の観察，土木学会論文集，第 370 号/Ⅲ-5，pp. 169~177，1986。
- Thill, R. E., Willard, R. L. and Bur, T. R. : Correlation of longitudinal velocity variation with rock fabric, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, pp. 4897~4909, 1969.
- Douglass, P. M. and Voight, B. : Anisotropy of granite : A reflection of microscopic fabric, *Geotechnique*, Vol. 19, pp. 376~398, 1969.
- Peng, S. and Johnson, A. M. : Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 9, pp. 37~86, 1972.
- Hadley, K. : Azimuthal variation of dilatancy, *J. Geophys. Res.*, Vol. 80, pp. 4845~4850, 1975.
- Scholz, C. H. and Koczyński, T. : Dilatancy anisotropy and the response of rock to large cyclic loads, *J. Geophys. Res.*, Vol. 84, pp. 5525~5534, 1979.
- Yanagidani, T., Ehara, S., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Terada, M. : Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress, *J. Geophys. Res.*, Vol. 90, pp. 6840~6858, 1985.
- Nur, A. : Effect of stress on velocity anisotropy in rocks with cracks, *J. Geophys. Res.*, Vol. 76, pp. 2022~2034, 1971.
- Nur, A. and Simmons, G. : Stress-induced velocity anisotropy in rock : An experimental study, *J. Geophys. Res.*, Vol. 74, pp. 6667~6674, 1969.
- Simmons, G., Todd, T. and Baldrige, W. S. : Toward a quantitative relationship between elastic properties and cracks in low porosity rocks, *Am. J. Sci.*, Vol. 275, pp. 318~345, 1975.
- Siegfried, R. and Simmons, G. : Characterization of oriented cracks with differential strain analysis, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, pp. 1269~1278, 1978.
- 柳谷 俊・西山 哲・寺田 孚：花崗岩のダイレイタンス異方性について，土木学会論文集，第 382 号/Ⅲ-7，pp. 63~72，1987。
- Jahn, R. H. : Sheet structure in granite : its origin and use as a measure of glacial erosion in New England, *J. Geol.*, Vol. 51, pp. 71~98, 1943.
- Hudson, J. A. : Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 64, pp. 133~150, 1981.
- Crampin, S. : Effective anisotropic elastic constants for wave propagation through cracked solid, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 76, pp. 135~145, 1984.
- Musgrave, M. J. P. : *Crystal Acoustics : Introduction to the Study of Elastic Waves and Vibrations in Crystals*, Holden-Day Inc., 1970.
- Neighbours, J. R. and Schacher, G. E. : Determination of elastic constants from sound-velocity measurements in crystals of general symmetry, *J. Appl. Phys.*, Vol. 38, pp. 5366~5375, 1967.
- Helbig, K. : Elliptical anisotropy-its significance and meaning, *Geophysics*, Vol. 48, pp. 825~832, 1982.
- Nye, J. F. : *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, 1957.
- Sano, O. : *Fundamental study on the mechanism of brittle fracture of rocks*, Dr. Thesis, Kyoto University, 1980.

- 22) Sano, O., Ito, I. and Terada, M. : Influence of strain rate on dilatancy and strength of Oshima granite, *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, pp. 9299~9311, 1981.
- 23) Johnson, S. A., Greenleaf, J. F., Samayoa, W. F. and Duck, F. A. : Algebraic reconstruction of spatial distributions of acoustic velocities in tissue from their time-of-flight profiles, in "Acoustical Holography Vol. 6", edited by Booth, N., pp. 71~90, Plenum Press, 1975.
- 24) Schomberg, H. : An improved approach to reconstructive ultrasound tomography, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, Vol. 11, pp. L181~L185, 1978.
- 25) Johnson, S. A., Greenleaf, J. F., Tanaka, M. and Flandro, G. : Reconstructing three-dimensional temperature and fluid velocity vector fields from acoustic transmission measurements, *I. S. A. Trans.*, Vol. 16, pp. 3~15, 1977.

(1986. 6. 26・受付)
