

X線CTとAE震源分布による破壊面の観察

増田幸治* JOUNIAUX, L.** 西澤 修*** 雷 興林†
劉 力強†† 馬 文濤†† 佐藤隆司* 楠瀬勤一郎*

Koji MASUDA, Laurence JOUNIAUX, Osamu NISHIZAWA, Xinglin LEI, Liqiang LIU, Wentao MA, Takashi SATOH and Kinichiro KUSUNOSE (1997) Fracture planes observed with X-ray CT images and AE hypocenter distribution. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48(8). p. 469-473, 5 figs.

Abstract: Images of fracture planes were obtained by acoustic emission (AE) hypocenter distribution and X-ray CT for a granite rock sample that was fractured under tri-axial conditions. The AE hypocenter distribution reveals the fracture plane during the experiment, whereas X-ray CT images are created before and after the experiment. Two fracture planes were observed in the X-ray CT image, whereas only one fracture plane was observed in the AE hypocenter distribution. This suggests that the time of formation was different for the two fractures.

要 旨

X線CTイメージングとAE震源分布とによる岩石破壊面の対比を行った。X線CTイメージは実験前と後に得られている。実験後のX線CTでは二つの破壊面が得られた。いっぽうAE震源分布では破壊面は一つしか観察できなかったが、この面は実験前のX線CTイメージで見られた面と一致している。X線CTで得られた二つの破壊面は形成時間が異なる。

1. はじめに

断層面の形成過程を解明するために、室内実験では岩石試料内に発生する微小破壊とともなって励起される高周波弾性波（アコースティック・エミッション、以下AEを略す）の震源分布の時間変化が調べられてきた（例えばLockner *et al.*, 1991; Satoh *et al.*, 1996）。最近、X線CTが地球科学試料の内部構造分析に有効であることが示され（西澤ほか, 1995）、岩石試料の内部構造とそれらの3次元像や展開像が抽出できるようになった。地質調査所では医療用X線CT装置を導入し、地球科学試料の分析をX線CTにより行っている。

X線CTによって破壊実験前に試料の非破壊検査を行

*地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)

**フランス地質研究所 (Laboratoire de Geologie & CNRS URA 1316, Ecole Normale Supérieure, Paris, France)

***地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

†(株)ダイヤコンサルタント (Dia Consultant Co., Ltd; Ikebukuro 3-1-2, Toshima-ku, Tokyo 171)

††中国国家地震局 (Institute of Geology, State Seismological Bureau; Beijing, China)

い、試料内部に既に存在する弱面、固着した破壊面を検出できる。また、X線CTで得られた岩石試料の内部構造を、AE震源分布によって推定される微小破壊の分布や、実験後に観察された破壊面と比べることによって、実験によって形成された破壊面と試料の内部構造との関係が明らかになる。さらに、X線CTでは、形成された破壊面の3次元的形状を簡単に調べることができる。以下に岩石試料の破壊面をAE震源分布とX線CTの両方の手法で観察した結果を速報する。

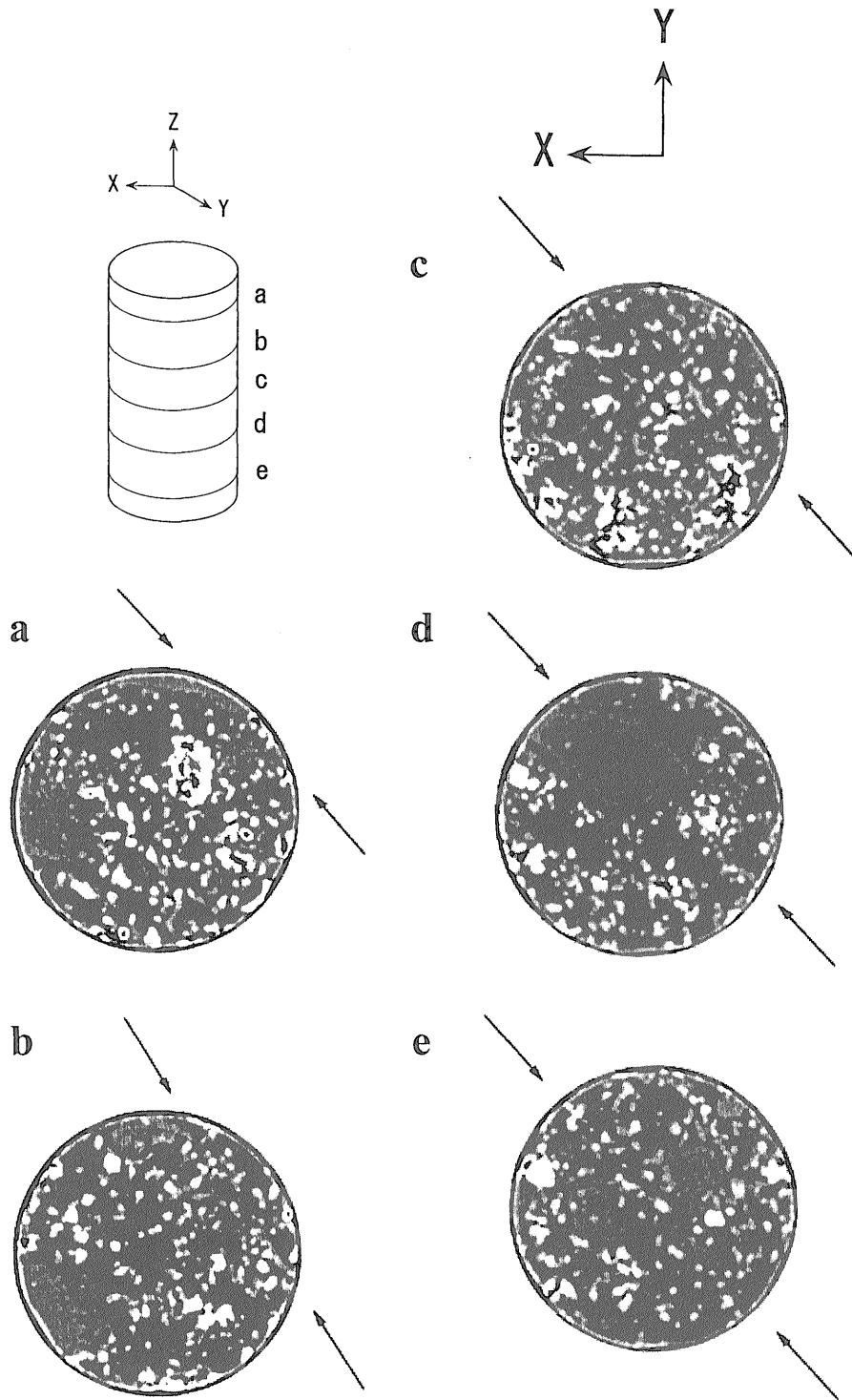
2. 実 験

フランスMayet産花崗岩（直径50mm、長さ100mmの円柱形）の三軸圧縮破壊実験を行った。試料は直径10mmを越える大きな粒子を含む粗粒花崗岩で、固着している巨視的な割れ目や鉱物脈が認められた。試料に40MPaの封圧を加えた後、試料が破壊するまで一定の増加率で差応力を加えた。試料は最終的に巨視的な破壊面を形成して破壊したが、封圧を加えたオイルが試料に浸入するのを防ぐために試料全体をシリコンラバーで覆っていたので、破壊後も円柱形状は保たれていた。実験には西澤（1997）と佐藤・西澤（1997）のシステムを用い、AEデータの解析には雷ほか（1997）のソフトウェアを使用した。X線CT画像撮影には地質調査所のX線CT装置を使用した。さらに詳しい結果は別に報告する（Jouniaux *et al.*, in preparation）。

3. X線CTによる破壊面の観察

実験前と実験後、試料の端面に平行な面の2次元X線

Keywords: X-ray CT, AE, fracture plane

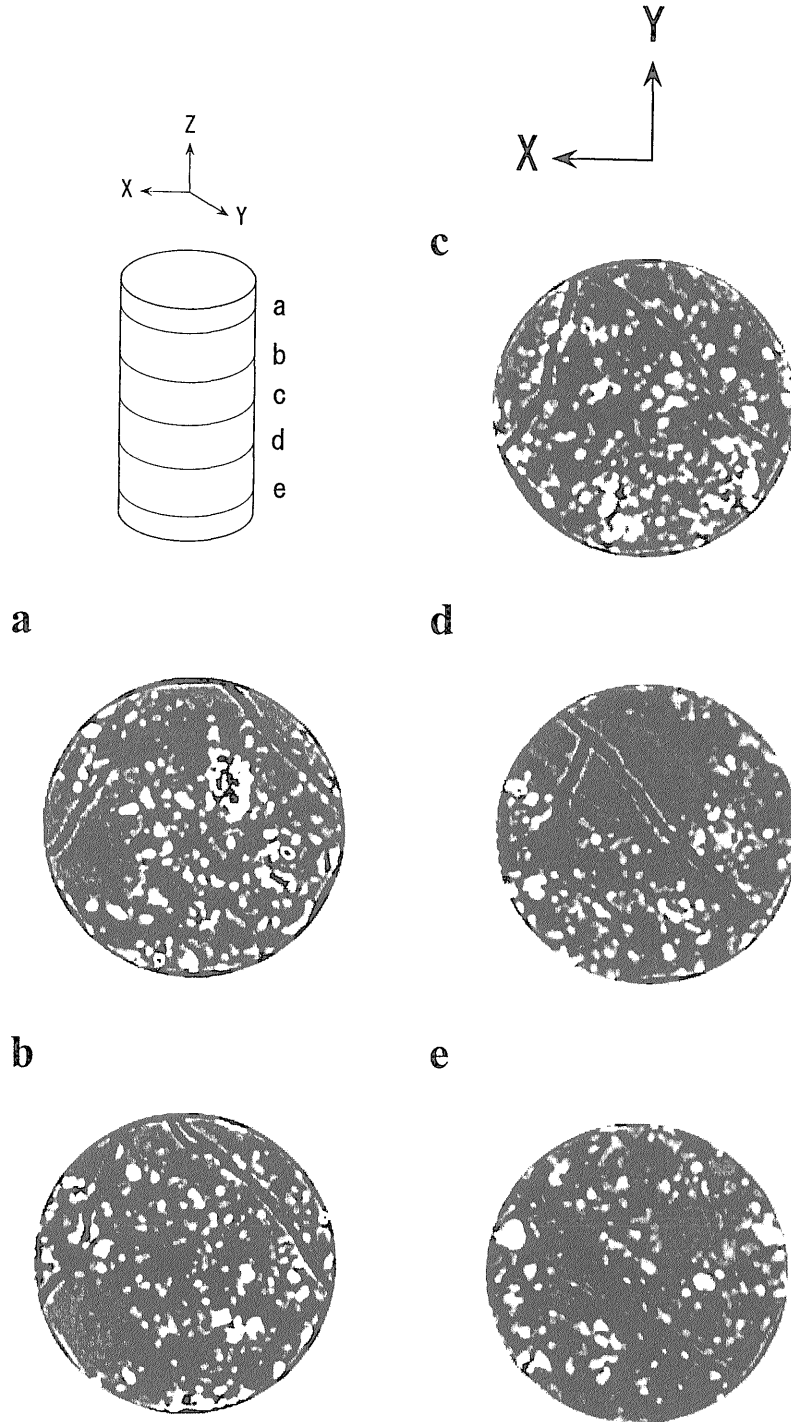


第1図 実験前の試料のX線CT像。矢印は試料表面で認められた巨視的な固着面の位置。試料の下端方向からみた図。

Fig. 1 Two-dimensional CT images of the granite sample before the experiment. Viewed from the bottom. The arrows indicate the positions of a pre-existing fracture plane observed on the surface of the sample.

CT画像を1mmおきに約100枚撮影した。撮影面の厚さは1mmである。X線CT画像は面内を透過するX線の透過率 (CT値) の2次元分布図である。CT値は物質の密度を反映している。第1図に実験前のX線CT画像の例を示す。実験に使った試料には固着した巨視的割れ目が認められる。第1図の矢印は岩石試料表面で確認できる

固着面の位置を示す。試料内部に線構造がみえるが、これは固着した破壊面は周囲の鉱物と密度が異なるためCT値のコントラストが現れるためである。例えば第1図dでは、左上に長軸20mmくらいの大きな鉱物粒子が写っており、固着した破壊面がその鉱物粒子の内部を通っているのが分かる。

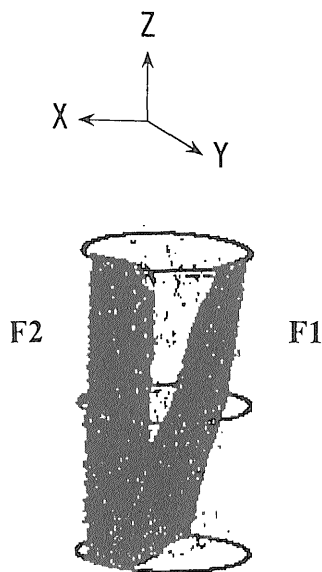


第2図 実験後の試料のX線CT像。破壊面が黒い線として写っているのがみえる。試料の下端面方向から見た図。
Fig. 2 Two-dimensional CT images of the granite sample after the experiment. Viewed from the bottom.

第2図に実験後のX線CT画像の例を示す。画像中の黒い線状の部分は実験後の破壊面である。破壊面は密度が周囲の鉱物と大きく異なるので容易に同定できる。画像に見られる線状構造や線状の低密度領域の位置は肉眼で認められた巨視的割れ目の位置に一致している。第2図aの左側、第2図dの左上をみると、破壊面が鉱物粒子を切っている様子がわかる。すべての断面のX線CT画像に対して画像処理を行い、破壊面のみを抽出し、それらを積み重ねて、破壊面の3次元像を構成したものを第3図に示す。最終的には2枚の破壊面(F1,F2)が形成されている。破壊面F1は試料をななめに切る位置に形成されており、実験前に認められた固着した巨視的な割れ目と一致する。破壊面F2はZ軸に平行でしかも試料の表面付近に形成されており、対応する固着した割れ目は認められない(第1図)。

4. AE震源分布による破壊面の観察

第4図にAEの震源分布のステレオ投影図を示す。第4図(a)は実験開始から最終破壊の5分前までに観測されたAEの中で震源決定されたAEのプロット、第4図(b)は最終破壊約5分前から破壊時まで観測されたAEの中で震源決定されたAEのプロットである。震源は面状に分布しており、第3図で示した破壊面F1と一致する。第3図のX線CTによる3次元画像では二つの破壊面(F1,F2)が存在するが、第4図のAE震源分布では表面付近に形成された破壊面F2は観測されていない。したがって、

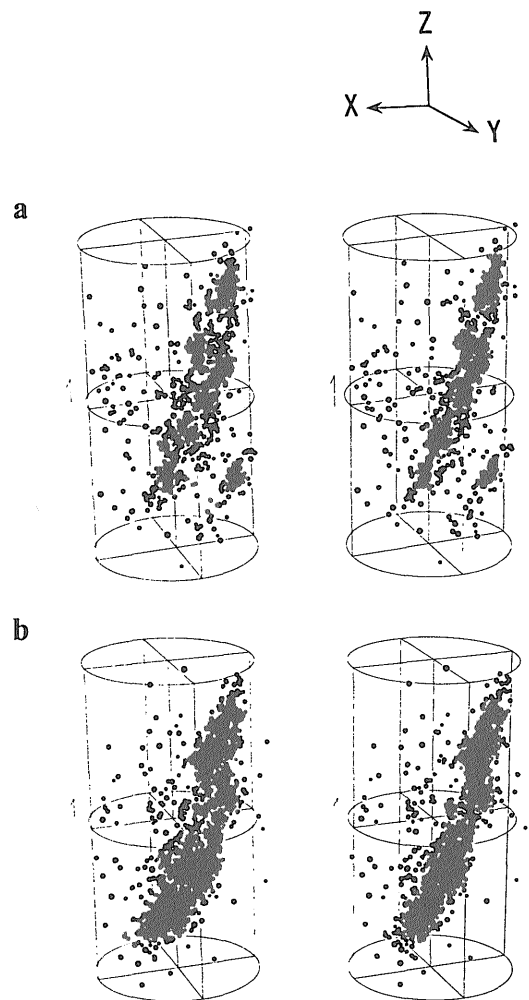


第3図 破壊面の3次元CTイメージ。2つの破壊面(F1,F2)が認められる。

Fig. 3 Three-dimensional CT image of the fracture planes. Two fracture planes (F1 and F2) are observed.

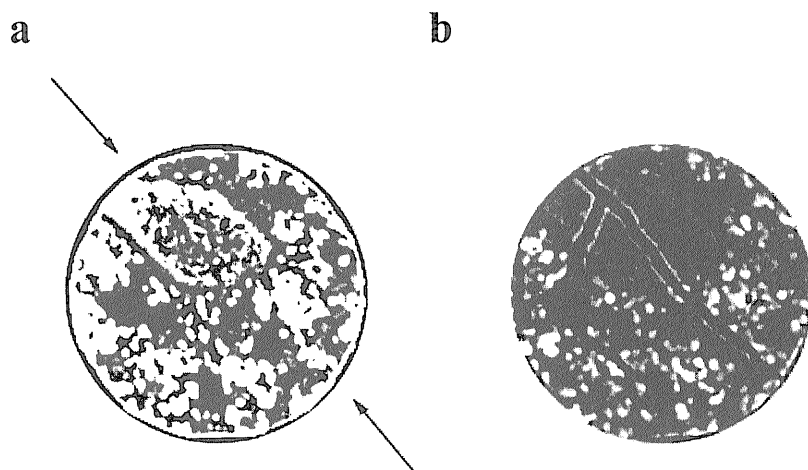
破壊面F2は岩石の変形に伴って形成されたものではなく、破壊面F1が形成された後に生じたものである。

第5図に第1図や第2図にdとして示した位置のCT画像を示す。第5図(a)は試料内部の固着した破壊面が強調されるよう画像の濃淡を処理したもの、第5図(b)は実験後のCT画像である。第5図(a)に矢印で示した面は第3図の破壊面F1の位置である。岩石の変形に伴って形成された面は、実験前にX線CTで観測された固着した巨視的割れ目に対応するのが分かる。一方第3図の破壊面F2に対応する固着面は第5図(a)ではみられない。したがって、試料内部に既に存在した固着した破壊面が岩石の変形に伴って破壊面を形成していったことが分かった。



第4図 AE震源分布のステレオ投影図。(a)実験開始から最終破壊の5分前まで、(b)最終破壊の5分前から最終破壊までの間に観測されたAEをプロットした。

Fig. 4 Stereographic projections of the AE hypocenter distribution. AE events observed (a) in the period between the start of the experiment and 5 min before the fracture, and (b) in the last 5 min before the final fracture are plotted.



第5図 第1図と第2図にdとして示した位置のCT画像。(a)試料内部の固着面が強調されるように画像の濃淡を処理したもの、(b)実験後のCT画像。

Fig. 5 CT images (a) before the experiment and (b) after the experiment. Contrast of the CT image of (a) is enhanced to show the pre-existing fracture plane. Position of the images corresponds to position d in Figure 1 and 2.

5. まとめ

X線CT画像による破壊面の3次元画像により、実験前後の破壊面の形状や位置を容易に観察することができる。また、破壊面と岩石中の鉱物粒子との位置関係も読み取ることができる。さらに、試料が完全に破壊していない場合でも試料内部の破壊面の検出やその3次元形状を把握できる。一方、AE震源分布では破壊面が形成されていく過程を微小破壊の位置の時間変化から推定することができる。二つの手法を併用することにより、断層面の形成過程をより詳しく解明できる。

謝辞 地殻物理部 中島善人氏、地殻熱部 大谷具幸氏、海洋地質部 池原 研氏にはX線CTスキャナーの操作やCT画像の処理についてご教示頂いた。地震地質部の桑原保人氏には査読者として原稿に対する有益なご意見を頂いた。これらの方々に感謝する。

文 献

雷 興林・西澤 修・佐藤隆司・楠瀬勤一郎 (1997)

Windows版AEデータ収録処理ソフト (WinAE)とその応用. 地調月報, 48, 447-457.

Lockner, D. A., Byerlee, J. D., Kuksenko, V., Ponomarev, A., and Sidorin, A. (1991) Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 350, 39-42.

西澤 修(1997) 封圧下での岩石のひずみと弾性波の多点計測のための油圧容器用多線型および同軸型電気信号取り出し口. 地調月報, 48, 431-438.

西澤 修・稲角忠弘・中野 司(1995) X線CTによる地球科学試料の内部構造分析技術とその応用. 地調月報, 46, 563.

佐藤隆司・西澤 修(1997) AE計測のための高速・多チャンネル波形記録システム. 地調月報, 48, 439-446.

Satoh, T., Shivakumar, K., Nishizawa, O., and Kusunose, K. (1996) Precursory localization and development of microfractures along the ultimate fracture plane in amphibolite under triaxial creep. *Geophys. Res. Lett.*, 23, 865-868.

(受付: 1997年6月30日; 受理: 1997年8月4日)