三軸圧縮応力下で発生する AE の 震源分布と発震機構

——安山岩中で発生する AE の発震機構——

地質調査所 佐 藤 隆 司
千葉大学理学部 出 原 理¹⁾
地質調査所 西沢 修・楠瀬勤一郎

(昭和 61 年 5 月 26 日受理)

Hypocenter Distribution and Focal Mechanisms of AE Events under Triaxial Compression

—Focal Mechanisms of AE Events in Yugawara Andesite—

Takashi SATOH

Geological Survey of Japan

Osamu IDEHARA¹⁾

Faculty of Science, Chiba University

Osamu NISHIZAWA and Kinichiro KUSUNOSE

Geological Survey of Japan

(Received May 26, 1986)

By using P-wave first motions, focal mechanisms of 61 acoustic emission (AE) events in a cylindrical sample of Yugawara andesite were determined during triaxial compression under a confining pressure of 20 MPa. The AE events were divided into the following two groups in terms of the space-time distribution of hypocenters. Group-I: the randomly distributed events. Group-II: the events belonging to a swarm activity precursory of the ultimate fracture which formed fracture planes nearly parallel to the loading axis. About two thirds of the events in the group-I show dilatational P-wave first motions at almost all the observation points. The focal mechanism of these events is considered as a sudden closure of pore. On the other hand, almost all the events in the group-II show quadrantal distributions of P-wave first motions which can be reasonably assigned to the double couple sources. The predominant orientations of their two nodal planes are subparallel to the fracture planes and nearly perpendicular to the loading axis. These focal mechanism solutions may suggest that the microfracturings in the swarm region are closely related to the stress-induced tensile cracks whose planes are preferentially oriented parallel to the forthcoming fracture planes.

昭和 60 年 4 月 5 日発表

¹⁾ 現所属: 名古屋大学理学部

§1. はじめに

岩石の変形・破壊様式が封圧とともに変化することを考えると、地下の応力状態に近い三軸圧縮試験で発生するアコースティック・エミッション（以下 AE と略す）震源の時空間分布を高い精度で求め、それと試料の変形や破断面の形状との関係を調べることは、地震発生機構解明のために重要である。このような目的で我々は、湯河原産安山岩を用いた三軸圧縮試験を行った。実験方法や AE 震源分布に関する結果は出原・他 (1986) に述べられている。ここでは、同じ実験データを用いて、AE 発震機構について調べた結果を述べる。

岩石の変形・破壊メカニズムを理解する上で、岩石内の微小クラックの形状やそれらの変形時の挙動を明らかにすることは極めて重要である。AE は岩石内の微小破壊によつて励起され则认为られており、その発震機構を調べることは、微小クラックの形状や挙動を解明するための有効な手段のひとつであろう。

近年、初動押引分布を用いて AE 発震機構を解明する試みがいくつかなされ、AE の多くはせん断型の微小破壊によつて励起されることが明らかにされている [千葉 (1985), 楠瀬・他 (1981), 楠瀬・他 (1982), KUWAHARA *et al.* (1985), NISHIZAWA *et al.* (1984), SONDERGERD and ESTEY (1982), YANAGIDANI *et al.* (1985)]. しかし、試料に取りつけたセンサ数の不足から、個々の AE についてその発震機構を求めた例は少なく、震源位置に無関係に重ね合わされた初動押引分布 [楠瀬・他 (1981), KUWAHARA *et al.* (1985)] や、空間的に近接して発生した AE の重ね合わせ初動押引分布 [楠瀬・他 (1982), NISHIZAWA *et al.* (1984), SONDERGERD and ESTEY (1982)] から推定されたものが多い。前者は、AE を伴う微小破壊に複数の型が存在する場合（例えば、せん断型クラックの発生に伴う AE と張力型クラックの発生に伴う AE とが混在しているような場合）、初動押引分布の解釈は簡単ではないだろう。後者は、解析方法の制約から、多くの AE の発震機構を求めるのは困難であり、得られた結果から全ての AE がせん断型破壊によつて生じると結論することは危険であろう。個々の AE の発震機構を最初に調べたのは SONDERGERD and ESTEY (1982) であるが、センサ数が 8 個と少ないため、結果の自由度は非常に大きいと考えられる。最近、千葉 (1985) は花崗岩の真三軸圧縮試験を行い、発生する AE の波形を 18 個の圧電素子を用いて記録し、30 個の AE の初動押引分布を求めた。その結果、せん断型破壊から期待される四象限型の押引分布だけでなく、ほとんど全方位で初動の方向が引きあるいは押しとなるものもあることが示された。しかし、得られた押引分布の数が少ないことなどから、発震機構と震源分布の関係等に議論を展開させることはできなかった。

本実験では、この種の実験としてはこれまでで最も多い 20 個のセンサを使つて AE 波形を記録したこと、AE センサからの同軸線を封圧容器から取り出す方法を工夫して S/N 比の高い AE 波形が記録できたこと [出原・他 (1986)] によつて、多くの AE について信頼性の高い初動押引分布を得ることができた。その結果、AE を発生する微小破壊はせん断型の破壊だけではないこと、AE 発震機構と震源分布や巨視的な破壊面との間に密接な関係があることが明らかにされたので以下に報告する。

§2. 実験方法

湯河原産安山岩の円柱試料（直径 50 mm, 長さ 100 mm）を用いて三軸圧縮試験（封圧 20

Fig. 1. Locations of 20 AE transducers (open circles) and 6 cross-type strain gauges (crosses) (after IDEHARA *et al.* (1986)). Transducers 19 and 20 were attached to the end-pieces. The Cartesian coordinate system used in this paper is also given.

MPa, 軸圧増加率約 4.3 MPa/分) を行い, 発生する AE の波形の記録, AE 発生数, ひずみ, 応力及び P 波速度の測定を行つた. 最終破壊は差応力約 390 MPa で発生し, 最大圧縮軸方向とほぼ平行な破断面が形成された. 実験装置, 実験方法の詳細は出原・他 (1986) に述べられているので, ここでは実験方法のうち, 本論文に関係の深い部分について簡単に記述する.

Fig. 1 にセンサの配置を示す. AE 波形は, 試料側面及び試料上下のエンドピース内に取り付けられた 20 個の圧電素子 (共振周波数 2 MHz, 直径 5 mm, 厚み振動型) によつて検出され, トランジェント・メモリ (サンプリング周波数 50 ns, 記憶語長 1024 語, 分解能 8 ビットまたは 10 ビット) で A/D 変換されたあと, FM データレコーダにアナログ出力され, 磁気テープに記録される. P 波初動の押し引きは, 震源決定のために磁気テープから再生された記録 [出原・他 (1986)] から読み取られた.

震源決定に使用する P 波速度構造を得るため, 軸圧 25 MPa ごとに, 5 番および 19 番の圧電素子から弾性波が励起され, AE 波形と同様にして磁気テープに記録された [出原・他 (1986)]. 各チャンネルの相対的な極性は, これらの波形の初動の方向を用いて決められた. 絶対的な極性は AE の初動押し引きと試料に加えられた巨視的応力場を比較することによつて推定された.

§3. 結 果

最終破壊までに発生した AE のうち, 163 個の AE の震源位置が決定された [出原・他 (1986)]. Fig. 2 に震源分布を示す. X-Z 平面への投影図中の破線は破断面のおおよその位置を表す. 破断面の走向は Y 軸方向とほぼ一致する. 破断面近傍に震源の集中域が見られる. Fig. 3 からわかるように, この震源集中域は最終破壊に先行する AE の群発活動によるもの

Fig. 2. AE Hypocenter distribution (after IDEHARA *et al.* (1986)). Dashed lines in the x - z projection denote approximate locations of the final fracture planes having the strikes nearly parallel to the y -axis. Note a cluster of the hypocenters around one of the fracture planes.

Fig. 3. Variation of the x -coordinate of hypocenters with differential stress. The cluster shown in Fig. 2 is due to a swarm activity prior to the ultimate fracture. In discussing AE focal mechanisms, the events were divided into following two groups as shown in this figure. Group-I: The events distributed randomly in the sample. Group-II: The events belonging to the cluster enclosed by dashed square.

である。この群発活動と破断面や試料の変形との関係は出原・他 (1986) において詳述されている。発震機構に関する議論において、AE を比較的ランダムに分布するもの (グループ I) と、群発活動に属するもの—差応力 360 MPa 以上で発生し、震源位置の X 座標が -16 mm 以下 (Fig. 3 の破線で囲まれた領域内) の AE—(グループ II) のふたつのグループに分ける。

震源位置が決定された 163 個の AE のうち、初動の押引を 10 点以上で読み取ることのできた AE が 70 個あった。Fig. 4 に初動押引分布 (下半球等積投影) の例を示す。初動の方向は、黒丸が押し (compression), 白丸が引き (dilatation) を表す。初動押引分布は、せん断型の破壊から期待される四象現型の分布 (quadrantial distribution) を示すものと、ほとん

Fig. 4. Two distribution patterns of P-wave first motion polarities: quadrantal distribution denoted as type-Q, and the distribution in which P-wave first motions are dilatational in almost all directions denoted as type-D. First motions are plotted using lower hemisphere equal-area projections. Open and solid circles denote dilatational and compressional first motions, respectively.

ど全点で引きが観測されるものとに分類できる。簡単のため、前者をQ型、後者をD型の押引分布と呼ぶ。初動押引分布の中には、ほとんど全点で引きが観測されるがQ型の押引分布のように四象現型の節線をひくことも可能なものが数例ある。そこで、初動押引分布による分類の基準として以下に示すふたつの条件を採用し、いずれの条件も満足しないものは分類不可能として議論の対象から除く。

Q型： 3点以上で押しが観測され、押引分布を満足する四象現型の発震機構解が存在するもの。

D型： 押しが観測される観測点の数が2点以下で、押引分布を満足する四象現型の発震機構解が存在しないもの。初動の押引を10点以上で読み取るこ

とのできた70個のAEのうち、Q、Dいずれかの型に分類されたAEが61個あった。分類結果をFig. 5に示す。群発活動に属するAE（グループII）と震源がランダムに分布するAE（グループI）との間で分類結果に顕著な相違が認められる。すなわち、グループIでは約2/3がD型に分類されるのに対し、グループIIでは90%以上がQ型に分類される。

四象限型（Q型）の初動押引分布の例はこれまでも数多く報告されている[千葉(1985), 楠瀬・他(1982), NISHIZAWA *et al.* (1984), SONDERGERD and ESTEY (1982)]が、D型の

Fig. 5. Numbers of the events classified into the type-Q and -D in the group-I and -II given in Fig. 3.

Fig. 6. An example of recorded waveforms and lower hemisphere equal-area projections of P-wave first motions for the type-D events. This event belongs to the group-I. The number to the left of each waveform indicates the transducer number in Fig. 1, and the solid circle, the first arrival of P-wave. The upward direction corresponds to the compressional motion.

初動押引分布はほとんど報告されていない。わずかに、千葉 (1985) が真三軸圧縮応力下の花崗岩中で発生した AE の中から 4 例報告しているだけである。Fig. 6 は、D 型に分類された AE の初動押引分布の例を、観測波形とともに示したものである。この AE はグループ I に属する。初動の立上りが明瞭なこと、観測点が震源球上にほぼ一様に分布していることから、この AE の発震機構をせん断型の破壊によつて説明することは不可能であろう。

Fig. 7 は、グループ II に属し、Q 型に分類された 26 個の AE の初動押引分布とそれから求められたせん断型の発震機構解である。得られた発震機構解は、ひとつの節平面の傾斜角が 90° に近く、他が 0° に近いものが多い。また、前者の走向は Y 軸方向とほぼ一致し、この節平面は最終破断面 (Fig. 2) とほぼ平行である。さらに、発震機構解には正断層型のものが多く、従つて、T 軸、P 軸の方向をプロットすると (Fig. 8 右図)、P 軸は Z 軸 (最大圧縮軸) 方向に、T 軸は X 軸方向に多く分布し、最終破断面の形状と調和的である。

一方、グループ I の場合 (Fig. 8 左図) は、P 軸はグループ II と同様に最大圧縮軸方向を向くものが多いが、T 軸の方向はグループ II に比べてばらつきが大きい。

§ 4. 議 論

4.1. ほとんど全方位で初動が引きとなる AE の発震機構

ほとんど全点で初動の方向が引きになる (D 型の) AE の発震機構としてまず考えられるのは、孔隙の急激な閉鎖であろう。SHIMADA and YUKUTAKE (1982) は、夜久野産玄武岩 (孔隙率 7.0%) の高封圧の三軸圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線に圧密が顕著に認められる時

Fig. 7. Focal mechanism solutions for all the type-Q events belonging to the group-II, superposed on the P-wave first motion data. Symbols are identical to those in Fig. 4.

期に、活発な AE 活動が見られることを示した。SHIMADA (1986) は、さらに、この実験で用いた試料の顕微鏡観察を行い孔隙が実際に潰れていることを見出した。従つて、孔隙の閉鎖によつて AE が励起されることは十分に考えられることである。

本実験では、応力-ひずみ曲線に現れるような顕著な圧密は認められない [出原・他 (1986)]。

Fig. 8. Orientations of T- and P-axes for all the type-Q events plotted separately for the group-I and -II. Open and closed symbols denote T- and P-axes, respectively.

しかし、BRACE (1978) によれば、孔隙率が 5% 程度以上ある岩石を三軸圧縮するとダイラタンシーと圧密が同時に発生する。本実験に用いた試料と同一ブロックから取り出した試料の孔隙率は 4.7% あった。従つて、本実験でも圧密が生じていた可能性は高いと考えられる。

D型の初動押引分布を示す AE の発震機構を解明するための直接的な方法として、SHIMADA (1986) と同様に、試料の顕微鏡観察を行うことが考えられる。しかし、本実験では AE 発生数が少ないことから、閉鎖した孔隙の数も少ないと考えられ、震源位置からその様な孔隙の位置がある程度わかつていたとしても、顕微鏡観察でそれを発見することは困難であろう。多孔質の岩石を三軸圧縮した場合、封圧が高いほど圧密度が大きいことが知られており [例えば SCHOCK *et al.* (1973), SHIMADA and YUKUTAKE (1982)], D型の AE が孔隙の急激な閉鎖によつて励起されたものであるとすると、その発生数は封圧とともに増加することが期待される。従つて、D型の AE の発震機構を解明するためには、さらに高封圧の実験を行うことが有効であろう。

4.2. 群発活動に属する AE の発震機構

群発活動に属する AE (グループII) の大部分は四象現型の初動押引分布を示し、その発震機構解は、ひとつ節平面の傾斜方向が最大圧縮軸とほぼ平行で、他がそれとほぼ直交するものが卓越することが示された。同様の傾向は、一軸圧縮応力下の花崗岩中で発生する AE の発震機構を調べた SONDERGERD and ESTEY (1982) によつて報告されている。また、NISHIZAWA *et al.* (1984) は、湯河原産安山岩の一軸クリープ試験中に発生した4個の AE の重ね合わせ初動押引分布から類似の発震機構解を得ている。さらに、本研究では、最大圧縮軸と平行に近い節平面が最終破断面とほぼ平行であり、群発活動域内で発生する微小破壊が巨視的な破断面の形成と密接な関係があることが示唆された。

一軸あるいは三軸圧縮応力を受けた岩石試料の顕微鏡観察によると、試料内には、最大圧縮軸方向とほぼ平行な張力型クラックが多く、せん断型クラックはあまり見られない [例えば KRANZ (1979a), TAPPONIER and BRACE (1976)]. このことから、SONDERGERD and ESTEY (1982), NISHIZAWA *et al.* (1984) は、最大圧縮軸とほぼ平行な節平面がクラック面に対応すると考え、そのような面にすべりの生じる原因について議論している。一方、群発活動域はクラックの密度が高く、クラック間の相互作用の影響が大きいと考えられる [KRANZ (1979a)].

KRANZ (1979b) は、一軸圧縮された花崗岩試料内を走査型電子顕微鏡を用いて観察し、クラック間あるいはクラックと孔隙間の相互作用に起因するクラックの伸展の例を多数報告している。その中に、雁行配列した最大圧縮軸方向に平行な張力型クラックが、それと直交するせん断型クラックによつて連結される例が示されており、特に群発活動域のようにクラックの密度の大きな領域では、最大圧縮軸とはほぼ直交する節平面がクラック面に対応する可能性も高いことを示唆する。

いずれにしても、初動押引分布だけからでは、クラック面に対応する節平面を決定することはできない。しかし、どちらの解釈に従うにしても、群発活動域内では、最終破断面に平行な張力型の微小クラックが卓越しており、それらが AE の発生に重要な役割をはたしていたと考えられ、破断面形成のメカニズムを考える上で興味深い。AE 波形の解析、ひずみとの比較などによつて、クラック面に対応する節平面を明らかにすることは、微小破壊から巨視的な破壊面が形成されるメカニズムを解明する上で非常に重要なことであろう。

謝 辞

孔隙率の測定に協力していただいた地質調査所鈴木祐一郎氏に感謝致します。なお、本研究は経常研究「地震物性の研究」の一部として行われた。

文 献

- BRACE, W.F., 1978, Volume Changes During Fracture and Frictional Sliding: A Review, *Pure Appl. Geophys.*, **116**, 603-614.
- 千葉 洋, 1985, 真三軸圧縮応力下にある花崗岩から放出される アコースティックエミッションの発震機構, 千葉大学修士論文.
- 出原 理・佐藤隆司・西沢 修・楠瀬勤一郎, 1986, 三軸圧縮応力下で発生する AE の震源分布と発震機構—実験装置と震源分布—, *地震* **2**, **39**, 289-300.
- KRANZ, R.L., 1979a, Crack Growth and Development During Creep of Barre Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, 23-35.
- KRANZ, R.L., 1979b, Crack-Crack and Crack-Pore Interactions in Stressed Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **16**, 37-47.
- 楠瀬勤一郎・西沢 修・伊藤久男・石戸経士・長谷川 功, 1981, 岩石の一軸圧縮試験における AE 発震機構, *地震* **2**, **34**, 241-250.
- 楠瀬勤一郎・西沢 修・小内 薫, 1982, 一軸圧縮下の岩石中に観測された AE 空白域, *地震* **2**, **35**, 91-102.
- KUWAHARA, Y., K. YAMAMOTO, M. KOSUGA and T. HIRASAWA, 1985, Focal Mechanisms of Acoustic Emissions in Abukuma-Granite under Uniaxial and Biaxial Compressions, *Tohoku Geophys. J.*, **30**, 1-14.
- NISHIZAWA, O., K. ONAI and K. KUSUNOSE, 1984, Hypocenter Distribution and Focal Mechanism of AE Events during Two Stress Stage Creep in Yugawara Andesite, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 36-52.
- SCHOCK, R.N., H.C. HEARD and D.R. STEPHENS, 1973, Stress-Strain Behavior of a Granodiorite and Two Graywackes on Compression to 20 Kilobars, *J. Geophys. Res.*, **78**, 5922-5941.
- SHIMADA, M., 1986, Mechanism of Deformation in a Dry Porous Basalt at High Pressures, *Tectonophysics*, **121**, 153-173.
- SHIMADA, M. and H. YUKUTAKE, 1982, Fracture and Deformation of Silicate Rocks at High Pressures in a Cubic Press, In: S. Akimoto and M.H. Manghnani (Editors), *High-Pressure Research in Geophysics. Adv. Earth Planet. Sci.*, **12**, 193-205.
- SONDERGERD, C.H. and L.H. ESTEY, 1982, Source Mechanisms and Microfracturing During

- Uniaxial Cycling of Rock, *Pure Appl. Geophys.*, **120**, 151-166.
- TAPPONIER, R. and W.F. BRACE, 1976, Development of Stress-induced Microcracks in Westery Granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **13**, 103-112.
- YANAGIDANI, T., S. EHARA, O. NISHIZAWA, K. KUSUNOSE and M. TERADA, 1985, Localization of Dilatancy in Oshima Granite Under Constant Uniaxial Stress, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6840-6858.