AE震源分布のフラクタル構造に基づいた 岩石内き裂系のモデル化に関する研究*

板倉 賢一¹ 渡部 義範² 佐藤 一彦³
後藤 龍彦⁴ 児玉 淳一⁵ 吉田 豊⁶

Modeling Method for Cracks in Rocks based on the Fractal Structure of the AE Source Distribution

by Ken-ichi ITAKURA¹, Yoshinori WATANABE², Kazuhiko SATO¹
Tatsuhiko GOTO¹, Jun-ichi KODAMA¹ and Yutaka YOSHIDA¹

1. Muroran Institute of Technology, 27-1 Mizumoto, Muroran 050-8585

2. Graduate Student, Muroran Institute of Technology

In underground construction it is important to obtain a discontinuities' model of rocks for simulations to evaluate rock stability around the working space and fluid flow in the rocks. In this study, an uniaxial compression test on a prism-shaped specimen of granite was conducted to develop a more feasible modeling method of cracks in rocks based on AE (acoustic emission) monitoring data and the fractal properties of the AE source distribution.

1. From this experiment, it was found that the AE source distribution was fractal and that the relationship between amplitude and frequency of AE was also fractal.

2. Crack distributions in the specimen and on the surface were both fractal.

3. A 3-D crack distribution model was constructed using AE monitoring data obtained from the experiment. In this model, the crack was described by a disk, and the fractal dimension of sectional lines that appeared on the surface of a specimen was adjusted to coincide with the dimension of lineaments extracted from a real crack image of the same surface of the specimen by correcting the AE parameters. That is, the relative AE energy for each event were altered iteratively until both fractal dimensions were matched.

It is thought that this new modeling method for cracks in rocks can be directly applied to field studies of underground construction in the future.

KEY WORDS : AE, Acoustic Emission, Fractal, Crack Model, AE Source Distribution

1. 緒 言

地下岩盤内に開削された空洞周辺には地層構造や地圧変化の影響により、大小様々なき裂が新たに生成される。この個々のき裂のキャラクタリゼーション(規模、形状、開口幅、方位等)や、対象とする岩盤全体のき裂系の評価は、地下空洞の利用を目的とする土木、炭鉱、鉱山、地熱開発、地下備蓄施設等の分野で空洞を維持、監視するために重要である。しかしながら、空洞周辺岩盤の内部に発達したすべてのき裂をキャラクタライズすることは

難しい。そこで、比較的規模の大きな岩盤内部のき裂を対象に、き裂系をモデル化する手法が種々提案されている。このき裂系のモデルは、岩盤の変形や透水性等のシミュレーションには不可欠である。Ivanova et al. (1995)によると岩盤内き裂系のモデル化手法は、1)力学的モデル、2)幾何学的モデル、3)1)と2)の複合的モデルに分類されている。力学的モデルは、実験や応力解析等の数値計算により求められるき裂系モデルであり、幾何学的モデルはボーリング等によるスキャンライン法のように、観測データをフラクタルや地質統計学的な解析を用いてモデル化する手法で、各種シミュレーションに利用されている(Chiles, 1988; 金子ら, 1990; 渡辺ら, 1992)。

本研究では、現場で観測可能なAE(acoustic emission)データと空洞壁面のき裂分布画像データを用いて、幾何学的なき裂系モデルを構築する手法を提案するとともに、その可能性を室内実験で検討した。

これまでに、著者らは原位置を初め室内実験を通じて応力状態の変化に伴う岩盤、岩石供試体内のき裂生成、進展過程をAE法により計測してきた(Itakura and Sato, 1986; Sato and Fujii, 1989; Itakura et al., 1995; Itakura et al., 1996; Itakura and

* 1998年7月21日受付 11月5日受理 資源・素材学会平成10年度(1998年4月1日)春季大会にて一部発表

1. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部情報工学科
2. 室蘭工業大学大学院学生 工学研究科情報工学専攻
3. 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部情報工学科
4. 正会員 工博 室蘭工業大学教授 工学部材料物性工学科
5. 正会員 室蘭工業大学助手 工学部材料物性工学科
6. 正会員 工博 室蘭工業大学助教授 工学部応用化学科
[著者連絡先] FAX 0143-46-5499 (室蘭工大・情報工学)
E-mail: itakura@csse.muroran-it.ac.jp

キーワード: AE, アコースティック・エミッション, フラクタル, き裂モデル,
AE震源分布

Sato, 1998)。その結果、空洞周辺岩盤の安定性を大域的に評価したり、き裂のキャラクターゼーションを推定するうえで、AE 法が有効であることを確認した。しかしながら、AE 計測ではシステムの周波数特性、ダイナミックレンジ等の制約から、空間的、時間的ならびにき裂の規模についても、特定の窓枠を通してき裂生成過程を観測していることになる。そこで、この窓枠を拡げてき裂系をモデル化するために、AE のフラクタル性（尺度不変性）を考慮してき裂系のモデル化を試みることにした。一方、空洞壁面に観察される 2 次元き裂分布もフラクタルであることが知られている（例えば、山本・小島, 1992; Xie, 1993）。これらの AE 計測結果と観察されたき裂分布を組み合わせる用いることにより、より現実的なき裂分布モデルを構築できると考える。

2. モデル化手法

岩盤表面のき裂分布形状の多くはフラクタルであることが知られているが、そのフラクタル性だけから岩盤内部のき裂分布を 3 次元的に推定した場合、幾通りものき裂分布が考えられ信頼性に乏しい。一方、岩石供試体の単軸圧縮試験や水圧破碎試験で発生した AE の震源分布もまた、フラクタルであった（Itakura et al., 1995; Itakura and Sato, 1998）。AE が岩盤や供試体内のき裂の成長、進展に伴い発生すると考えると、AE データから得られる震源分布や規模等の情報を基に、岩盤内部のき裂分布をモデル化すれば、より信頼性の高いき裂モデルの構築が期待される。その際に、岩盤表面のき裂分布形状と AE データから構築されるき裂分布形状に、整合性が保たれる必要がある。そこで、AE 震源分布データと AE の相対エネルギー等のデータを組み合わせてき裂分布モデルを作成し、このき裂モデルにより岩盤表面に現れたき裂分布と、実際に現場で観察されるき裂分布が似た形状になるようにモデルを作成することにした。

Fig. 1 は、このモデル作成手法の流れ図である。3 次元の AE 計測により、き裂の中心位置に相当する AE 震源位置、き裂の相対的な規模に相当する相対 AE エネルギー（Itakura and Sato, 1986）、き裂の方位に相当する AE 発生機構解析（Sato and Fujii, 1989）でのモーメント・テンソルの主方向等を用いて、円盤き裂分布モデルを作成する。一方、壁面のき裂分布画像からき裂分布あるいはき裂リニアメントの分布を抽出し、2 次元でのフラクタル次元を求める。次に 3 次元の円盤き裂モデルにおいて、壁面観察箇所に相当する断面上に現れたき裂線分布のフラクタル次元を求め、両者のフラクタル次元が一致するように、AE の規模別頻度分布等に基づき AE 震源数、相対エネルギー等を反復

Fig. 1 Modeling procedure of 3-D crack system in rocks based on the fractal geometry of AE source distribution and 2-D cracks image.

調整し 3 次元円盤き裂モデルを修正する。

以上が最終的な 3 次元き裂分布モデル構築の手法であるが、フラクタル次元を一致させるために 3 次元円盤き裂分布を修正する方法には、様々なバリエーションが考えられる。例えば、円盤き裂の方位を岩盤内のき裂配向性に従って与えることも可能であり、極微小なき裂分布まで必要な場合には、フラクタル性を考慮した 3 次元カスケード法（山本・小島, 1992）等により AE 震源の空間分布を補間することも可能である。

以下には、この手法を一部簡略化し、角柱供試体の単軸圧縮実験に適用した結果について述べる。すなわち、供試体内部を未知の岩盤内部と考え、供試体の適当な一面を実際にき裂分布が観察可能な岩盤表面に見立てて、実験を行った結果である。また、上述の手法の簡略部分としては、円盤き裂の方位をランダムに与えた点と、AE 震源の空間補間を行わず、円盤の直径に相当する相対エネルギーの大きさだけを一律に調整した点である。

3. 実験装置および方法

3・1 供試体

岩石供試体として、稲田産花崗岩を用いた。供試体の寸法は、約 30 mm × 30 mm × 60 mm で、上下面が Grain 面（Dale, 1923）になるように角柱に整形した。したがって、供試体の側面が Rift 面と Hardway 面に相当する。Grain 面、Rift 面、Hardway 面に垂直な軸方向の弾性波速度（P 波）は、それぞれ 4,024 m/s, 3,673 m/s, 4,375 m/s であった。載荷軸は、Grain 面に垂直な方向に設定した。

Fig. 2 は、この供試体の Hardway 面の一部を 35 倍に拡大した画像である。載荷前(a)と載荷後(b)の同一箇所の画像であり、画像中の白い細線がき裂である。供試体の Hardway 面には、ほぼ垂直方向に卓越した微小き裂が存在している。これらの微小き裂の存在が、この花崗岩の異方性を支配していると考えられる。(b)より、載荷後には新たな微小き裂の発生とともに、先在微小き裂が載荷軸方向に進展しているのがわかる。また、Grain 面に平行な方向にもき裂の進展が見られた。

3・2 実験装置

Fig. 3 は、今回の実験で AE 計測用に使用したコニカル PZT 素子（富士セラミックス社製、Z5T(1)4ED-WYX(C-6)、共振周波数 320 kHz）と、供試体への取り付け方法を示した図である。この圧電素子の形状は円錐台で、その先端直径が 1 mm、高さ 5 mm、最大径 4 mm である。この素子のプラス側電極をエポキシ系接着剤で薄くコーティングした後、アルミ箔で被覆した。アルミ箔はマイナス電極と接触しており、同軸ケーブルのシールド側に結線されている。このセンサの供試体への取り付けには、スプリング入りの「コ」の字型アルミ製キャップを用い、同図に示すように接着剤で供試体に固定した。この方法で、センサを供試体へ 6 個取り付けた。Fig. 4 は、センサの供試体への取り付け位置を示しており、裏面にも対称に配置した。

Fig. 2 Crack distribution images on the hardway plane of specimen before(a) and after (b) uniaxial compression test.

Fig. 3 Conical-type PZT for AE sensor (a) and sensor cap to attach the sensor on a specimen (b).

Fig. 4 Dimensions of specimen and locations of AE sensor.

Fig. 5は、実験システムのブロックダイアグラムである。各AEセンサ出力は、プリアンプ (Dunegan/Endevco 1801-200B)、メインアンプ (Dunegan/Endevco 3,000 series) で 70 dB 増幅した後、高速AD変換装置 (マルチディジタル化、オートニクス社製 Model APC-510、サンプリングタイム 50 nsec、分解能 8 bit、記録長 1,024 word) を経由してパーソナルコンピュータのハードディスク内に記録した。このAE波形の記録は、6チャンネルの内いずれかの信号がしきい値を超えると記録する方式を採用した。また、1チャンネルのセンサからの出力だけを分岐し、デュアルカウンター (Dunegan/Endevco 3,000 series) およびエンベローププロセッサ (Dunegan/Endevco 3,000 series、エンベロープタイム 10 msec) に入力し、リングダウンカウント数、イベント数の計数に用いた。これらの出力は、荷重や変位の記録を行うAD変換器へ送り、それらとともに記録した。

载荷にはサーボコントロール式材料試験機 (MTS 社製、容量 200 ton) を用い、変位制御方式 (換算ひずみ速度: 8.3×10^{-6}

/s) で载荷した。また、エンドピースとプラテンの間には、雑音が伝わらないようにテフロンシートを挿入した。本実験ではき裂進展に伴う AE を計測するのが目的であるため、载荷後最大強度点を超えた時点で直ちに除荷した。载荷終了後供試体を回収し、染料 (赤) 入りのシアノアクリレート接着剤に浸けた。次に、固化した供試体を Grain 面に平行な方向にダイヤモンドソーで粗く 5 分割し、各切断面が Grain 面とほぼ平行になるように研削した。その後、供試体の両端面と研削した 8 面を、光ファイバー式マイクロ스코プ (マイクロウォッチャー、三菱化学社製、VS-60) で観察、画像を記録した。

4. 実験結果および考察

4・1 AE 活動の経時変化と規模別頻度分布

Fig. 6は、载荷過程で発生した AE を 1 チャンネルの AE センサが捕らえた累積イベント数、AE カウントレート (1 秒当たりのリングダウン・カウント数) ならびに応力の経時変化である。累積イベント数と応力の経時変化は曲線 (目盛は共通) で、AE カウントレートは棒グラフで表している。75 MPa あたりから AE が増加し始め、その後規模の大きな AE が多発し、最大強度点に至った。

この载荷過程で発生した AE の内、震源標定できた 409 データの相対 AE エネルギーによる規模別頻度分布を、Fig. 7 に示す。ここでの相対 AE エネルギーは、各 AE センサが捕らえた AE 波形の最大振幅値の 2 乗値から、伝播距離による補正を行い、震源位置での相対エネルギーに換算した値を用いた (Itakura and Sato, 1986)。直線性のある部分の傾きから (図中の R^2 は、相関係数の 2 乗値を表す)、 b 値は 0.10 と求まり、最大振幅と頻度の関係はフラクタルであることがわかる (Scholz, 1990)。AE

Fig. 6 AE activity during loading of specimen.

Fig. 5 Blockdiagram of experimental apparatus.

Fig. 7 Distribution of frequency-relative AE energy distribution.

波形データの取り逃しがなければ、より低い最大振幅範囲まで直線傾向を示すと考える。

4・2 2次元き裂分布とフラクタル

Fig. 8は、供試体を切断する前に観察された供試体側面のき裂分布を、切断後の供試体の写真上に重ね合わせた図である。図中の白い線が载荷により発生したき裂であり、比較的規模の大きなき裂だけを表示してある。同図の供試体写真中に見られる平行な4本の黒色部分は、切断および研削により欠如した領域である。また、図中には、各断面の番号と断面位置を表すスケールも加えてある。規模の大きなき裂は、Hardway 面の右側に楔状に密集していることがわかる。

Fig. 8 Crack distributions on the hardway plane (a) and rift plane (b) of specimen.

Fig. 9 Crack distribution on the sectional planes and fractal dimension. Small squares show the images of each section after coloring the cracks, and large squares are crack maps.

Fig. 9 は、供試体を 5 分割した後の上部から 9 面 (Fig. 8 の断面番号 1 から 9 に相当) のき裂分布画像と、それぞれのき裂分布のフラクタル次元を求めた結果である。同図において、小さな各正方形が断面の画像で、大きな正方形は画像から抽出したき裂分布である。139 × 139 の画素で構成されている。正方形の上下の辺が Hardway 面に相当し、左右の辺が Rift 面に相当する。このき裂分布からボックスカウンティング法により求めた $\log N(r) - \log(r)$ プロットを、それぞれ示してある (これ以降のフラクタル解析では、すべての対数の底には e を用いている)。いずれの断面でもフラクタルであり、そのフラクタル次元は 1.01 ~ 1.40 であった。き裂分布の複雑な箇所ほど、高いフラクタル次元を示していた。その箇所は、Fig. 8 における Hardway 面の右側の中央やや上側の位置に一致する。すなわち、側面でき裂が広い範囲に分布している箇所は、内部にもき裂が発達しており、より複雑な構造になっていることがわかる。

4・3 3次元き裂分布の再構成とフラクタル

供試体の切断面および両端面から得た 10 箇所の 2 次元き裂分布を用いて、3 次元のき裂分布を再構成した。再構成に当たっては、市販のソフトウェア (Slicer, Fortner Software 社製) を用いた。139 × 139 のボクセルを、両端面に関しては同じものを 27 段、各切断面に関しては同じものを 28 段、計 278 段重ねて作成した。Fig. 10(a) は、その再構成結果であり、供試体内部の様子が見えるように一部を取り除いた表示である。また、(b) は空間線形補間を施した結果である。供試体手前の Hardway 面と Rift 面の角に、き裂が集中している。この 3 次元き裂分布の下側半分を対象に、ボックスカウンティング法により $\log N(r) - \log(r)$ プロットを求めた結果が Fig. 11 である。下側半分だけを対象にしたのは、後に示す AE の震源分布において、規模の大きな AE が下側に集中していたことと、ボックスカウン

Fig.10 3-dimensional crack distribution reconstructed using crack maps of sectional planes. (a) shows a voxel model and (b) shows an interpolation model.

Fig.11 Fractal dimension of 3-D crack distribution on the bottom-half of the specimen.

ティング法を 3 次元に拡張して使用するためである。これによると 3 次元き裂分布はフラクタルであり、その次元は 2.12 になった。この 3 次元き裂分布のフラクタル次元を D_3 とすると、供試体切断面のき裂分布のフラクタル次元 D_2 (下半分の各断面における D_2 は、1.03 から 1.32 であった) との間には、おおよそ $D_3 = D_2 + 1$ の関係が成り立っていた。2 次元と 3 次元のフラクタル次元間には線形な関係があるとの報告があるが (渡辺ら, 1992), この関係を裏付けるデータが蓄積されたならば、3 次元き裂モデルの構築がより簡便になると考える。

4・4 AE 震源分布のフラクタルとき裂分布

Fig. 12 は、反復最小自乗法 (Itakura and Sato, 1986) により求めた AE 震源分布を Hardway 面(a)と Rift 面(b)に投影した結果である。また、(c)は Fig. 10 と同様に、Hardway 面と Rift 面の境から見た震源分布である。各球の中心が求めた AE 震源位置であり、球の直径は AE の相対エネルギーを表している。同図では、AE の相対エネルギーが小さな震源は点で表されており、比較的規模の大きな震源だけが球として表示されている。

一般に、岩石の単軸圧縮試験において供試体が破断に至るまでの過程で発生する AE は、次のような傾向を示すことが知られている (Itakura and Sato, 1986)。すなわち、載荷初期には小規模な AE が供試体内に広く発生し、やがて一箇所に集中し始め、破断直前には後の破断面上に沿って規模の大きな AE が集中する。本実験の AE 計測により震源標定された 409 個の事象の内、比較的規模の大きな AE の震源は、Fig. 12 に見られるように、Hardway 面と Rift 面の境界線の下側から斜め上方に広がる面上に分布していることがわかる。Fig. 12 の震源分布は、主に破断直前に後の破断面上に発生する比較的規模の大きな AE を表していると考えられる。中でも、最も規模の大きな AE は、Hardway 面と Rift 面の境界線の下側に発生しており、Fig. 9 や Fig. 10 に見られるき裂の集中箇所の下部にほぼ一致する。すなわち、この箇所からき裂が発生し、その後上方および斜め上方のき裂が発生したと推察される。しかしながら、主要なき裂分布と AE 震源分布はよく対応するものの、Fig. 8 や Fig. 9 に見られる Hardway 面と Rift 面の境界線に沿って、ほぼ楔型に分布している比較的規模の大きなき裂に相当する AE は、検出されていない。この原因としては、き裂の発生に伴う供試体内の P 波速度構造の変化や、AE センサ数の制約等が考えられ、AE データを用いてき裂のモデル化を行ううえで、今後、考慮すべき問題の一つと考える。

Fig. 13 は、供試体の下側半分の AE 震源分布の $\log N(r) - \log(r)$ プロットである。フラクタルであり、その次元は 2.08 であった。

Fig.12 3-dimensional AE source distribution mapped on the hardway plane (a), the rift plane (b) and the slant view (c).

Fig. 13 Fractal dimension of AE source distribution on the bottom-half of the specimen.

Fig. 14 3-dimensional disk model of crack distribution.

Fig. 15 Sectional lines of disk model appeared on the middle section of the specimen and its fractal dimension.

4・5 円盤き裂モデル

AE 震源分布データならびに相対 AE エネルギーデータを用いて、厚みの無い円盤き裂モデルを作成した。AE 震源位置に円盤の中心を置き、円盤の直径を相対エネルギーに比例した値とした。また、円盤の方位はランダムに与えた。当初、AE の発生機構解析によりモーメント・テンソルの主方向 (Sato and Fujii, 1989) を円盤の方位に割り当てることを試みたが、6 チャンネルすべてに波形が記録できていなかった事象が多々あり、最終的に得られた事象数が極端に低くなったため、ここでは方位をランダムに与えることにした。同様に、楕円盤を用いなかった理由および円盤に厚みを持たせなかった理由も、発生機構解析によるデータ数の不足によるもので、今後の課題といえよう。

Fig. 14 は、得られた円盤き裂分布モデルである。この図では、規模の小さなき裂も表示できるように、円盤直径と相対 AE エネルギーの比例係数を調整している。

4・6 円盤き裂モデルの断面形状とき裂分布

上述の 3 次元円盤き裂分布モデルを任意断面で切断し、切断面に現れる直線き裂分布のフラクタル性を調べ、フラクタル次元のコントロールを試みた。

Fig. 16 Fractal dimensions of sectional lines of disk model after altering uniformly the model parameter. Sections are sliced down from the middle of specimen to the bottom in 5 mm-pitch.

Fig. 15 は、供試体中央の Grain 面に平行な断面の様子で、円盤直径と相対 AE エネルギーの比例係数を一律に円盤がやや大きくなるように設定した場合の、切断面画像と $\log N(r) \cdot \log(r)$ プロットである。フラクタルであり、その次元は 1.64 になった。次に、円盤直径と相対 AE エネルギーの比例係数を適当に反復修正し、Fig. 9 に示した供試体切断面上のき裂分布のフラクタル次元に近い値になるようにした結果が、Fig. 16 である。同図では、供試体の中央を Fig. 8 のスケールに示すように 0 mm とし、5 mm ごとに供試体底部に向けて切断して求めた面内の直線き裂分布である。同図には、Fig. 8 に示した実際の供試体の切断面番号も示してある（ただし、(d) の -15 mm の箇所に該当する実際の切断面はない）。いずれもフラクタルであり、その次元は 1.39~1.08 に納まっている。すなわち、Fig. 9 における切断面上の実際のき裂のフラクタル次元に近い値に、調節することができた。また、Fig. 8 や Fig. 9 に見られたき裂分布の複雑な箇所ではモデルのフラクタル次元も高く、き裂分布の複雑さに調和してフラクタル次元が変化していることがわかる。

以上のように、モデルのフラクタル次元を実際に観察できる任意面のき裂分布のフラクタル次元に、相対 AE エネルギーの比例係数だけを調節して（円盤き裂モデルの円盤直径を変化させる）、近づけることが充分可能であることがわかった。しかしながら、よりもっともらしい 3 次元き裂モデルを構築するためには、取り逃しの少ない AE 計測を行い多くの AE 震源標定数を得、個々のき裂の方位を特定する必要がある。特にき裂の方位は、AE 計測データにこだわらなければ、既知のき裂方位分布等を用いることも可能であろう。

5. 結 言

本研究で提案する AE 計測データとき裂のフラクタル性を考慮したき裂モデルの構築方法を角柱供試体の単軸圧縮試験に適用した。その結果、本手法により 3 次元き裂モデルを構築できることが確認された。しかしながら、本手法により構築されたモデルは、供試体あるいは岩盤壁面の実際のき裂観察により得られるフラクタル次元と、3 次元円盤き裂モデルから得られる 2 次元線分き裂分布のフラクタル次元を一致させるという制約と、AE 震源位置にき裂の中心を配置するという制約を設けただけであり、これら 2 つの制約下では、未だに幾通りものモデル構築が可能である。本手法によるモデルをより現実のき裂分布に近づけるためには、

- 個々のき裂の方位の決定、
- き裂寸法の合理的な決定、
- 計測できなかった AE データの補間等

を行わなければならない。き裂の方位の決定やき裂寸法の決定に関しては、AE 発生機構解析による方法や既知のき裂方位分布、き裂の規模分布等を利用した統計的な手法の導入等が考えられる。また、AE データの欠損を AE のフラクタル性を考慮して補間する方法としては、規模別頻度分布や AE 震源分布のフラクタル性を利用する方法が考えられる。本研究におけるモデル構築手法のこれらの限界が克服されたならば、地下空洞の開削等において AE 計測と壁面のき裂分布観察より岩盤奥部のき裂分布をモデル化できることから、将来は現場への適用も充分可能と考える。

以下に、本実験を通して得た結果についてまとめる。

1) 異方性を持つ花崗岩の角柱供試体の単軸圧縮試験により、供試体表面および供試体切断面に見られたき裂分布はフラクタル

であることがわかった。そのフラクタル次元は、き裂分布の複雑さを反映していた。

2) 供試体切断面のき裂分布から再構成された 3 次元き裂分布もまた、フラクタルであることがわかった。

3) 載荷過程で発生した AE の震源分布は、供試体内の主要なき裂分布とほぼ一致していた。また、AE の震源分布はフラクタルであった。

4) AE 震源分布データおよび相対 AE エネルギーデータを基に、3 次元円盤き裂モデルを作成した。この円盤き裂モデルの任意断面の、2 次元直線き裂分布もまたフラクタルであった。このフラクタル次元は、円盤の直径を左右する相対 AE エネルギーの比例係数だけを調節することで、任意に変えられることが確かめられた。これにより、実際の観察面上のき裂分布のフラクタル次元と、3 次元円盤き裂分布モデルから得られるフラクタル次元を一致させることにより、最終的な 3 次元円盤き裂分布モデルを得ることができた。

今後は上述のように、より確からしい 3 次元き裂分布モデルを構築するために、より多くの AE 事象に対してき裂の方位や厚さ、規模や形状を与える AE 発生機構解析等の確立を目指す。また、本実験結果に対しては検討しなかったが、より微小なき裂分布も含めたモデルを構築するに当たっては、AE 震源分布のフラクタル次元を保ったまま震源分布の確率密度関数や規模別頻度分布を用いて円盤モデルを対象領域内に配置する手法も考えられる。これらは、フラクタル性を考慮したき裂系モデル構築の優位な点と考えられる。これらの課題に、今後取り組む予定である。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金・基盤研究(C)(2)(08651106)により行った。

引 用 文 献

- Chiles, J. P. (1988): Fractal and Geostatistical Methods for Modeling of a Fracture Network, *Mathematical Geology*, Vol. 20, No. 6, p. 631-654
- Dale, T. N. (1923): The Commercial Granites of New England, *Bull. U. S. Geol. Surv.*, 738, p. 438
- 石村貞夫・石村園子 (1990): フラクタル数学, 東京図書, p. 246-254
- Itakura, K. and Sato, K. (1986): Clustering and Migration of AE prior to Main Faulting in Rock, *Progress in Acoustic Emission III*, p. 318-325
- Itakura, K., Sato, K. and Nagano, K. (1995): Fractals on Acoustic Emission during Hydraulic Fracturing, *J. Acoustic Emission*, 13, 3/4, p. s75-s82
- Itakura, K., Sato, K. and Nagano, K. (1996): Fractals on AE Source Distribution and Fracture Surface formed by Hydrofracturing of Rock Specimen, *Progress in Acoustic Emission*, Ⅷ, p. 305-310
- Itakura, K. and Sato, K. (1998): AE Activity and Its Fractal Properties with Hydrofracturing of Rock Specimens, *Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, VI, p. 29-42
- Ivanova, V. et al. (1995): Development of stochastic models for fracture systems, *Rock Mechanics*, Daemen & Schults (eds), Balkema, Rotterdam, p. 725-730
- 金子勝比古・小池克明・野口義文・伊藤博之 (1990): 岩盤き裂群の定量化—き裂計測とモデリング—, 第 1 回地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, p. 25-29
- Sato, K. and Fujii, Y. (1989): Source Mechanism of a Large Scale Gas Outburst at Sunagawa Coal Mine in Japan, *PAGEOPH*, 129, p. 325-343
- Scholz, C. H. (1990): *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge Univ. Press, p. 180-189
- 渡辺公雄・中山佳映・高橋秀明 (1992): 地下き裂群の 3 次元フラクタルモデル, 第 2 回地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, p. 80-85
- Xie, H. (1993): *Fractals in Rock Mechanics*, Balkema
- 山本 肇・小島圭二 (1992): 岩盤割れ目系の空間的集中特性—カスケードを用いた表現—, 第 2 回地下き裂のキャラクタリゼーションワークショップ論文集, p. 75-79