

# AE震源分布のフラクタル次元解析による 高温岩体地熱貯留層評価の試み

石田毅<sup>1</sup>・陳渠<sup>2</sup>・海江田秀志<sup>3</sup>・水田義明<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 正会員 工博 山口大学助教授 地域共同研究開発センター

(兼 大学院理工学研究科社会建設工学専攻 〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

<sup>2</sup> 正会員 工博 応用地質(株) oyo コアラボ調査技術部 (〒330-0038 大宮市宮原町 1-66-2)

<sup>3</sup> 工博 (財)電力中央研究所 我孫子研究所地質部主任研究員 (〒270-1194 我孫子市我孫子 1646)

<sup>4</sup> 正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2557)

高温岩体の地熱抽出においては、水圧破砕により造成される貯留層の評価が重要である。本研究では、AE震源の空間分布に対してフラクタル次元を求め、その結果から貯留層の形状を評価し、また水圧破砕によって造成される亀裂の進展メカニズムについても新たな情報を得る手法の検討を行った。まずフラクタルとフラクタル次元の概念を整理して示したのち、震源分布を模擬した点の分布モデルを用いて基礎的な検討を行い、この手法の有用性と信頼性の限界を調べた。その結果に基づき、深度1000mの坑井を用いた高温岩体発電実験のAE震源分布のフラクタル次元を求め、その結果を現地の地質状態などと比較して造成された貯留層の性状の評価を行い、この手法により新たな観点から貯留層を評価できる可能性があることを明らかにした。

**Key Words:** fractal dimension, hot dry rock, hydraulic fracturing, AE(acoustic emission), rock mechanics

## 1. はじめに

乾燥した高温の岩盤から地熱の抽出を行う高温岩体発電では、地表から地下の高温の岩盤に向けて坑井(注入井)を掘削し、この坑井に地表から高圧の水を圧入し、岩盤内に人工的に亀裂を造成し進展させる。そして、この亀裂を貫くように別の坑井(生産井)を掘削し、地表から注入井を通して岩盤内に水を圧入することにより、生産井から熱水と蒸気を回収する<sup>1,2)</sup>。したがって、造成された亀裂の幾何学的形状やその性状についての地熱貯留層の評価が、効率的な発電システムを構築するために重要である。

地熱貯留層の評価には、AE(Acoustic Emission)測定、トレーサ試験、電気探査法などが実際に大規模な現場実験に適用され、他のさまざまな方法も実用化のために研究開発が進められている<sup>3)</sup>。これらのなかでもAE測定は、水圧破砕による亀裂の形状評価や亀裂の進展機構の解明に欠くことのできない有用な手法である。従来、AEの震源決定結果は主に亀裂の形状の評価に用いられてきたが、これにフラクタル

幾何学を適用すれば、造成された貯留層の性状を新たな観点から評価できる可能性がある。例えば、AE震源分布のフラクタル次元を求めれば、貯留層シミュレーションに用いるべきモデルとして平行平板モデルが適するか、複雑な亀裂系を念頭に置いた多孔質モデルが適するか等の判定材料を得ることができよう。また、得られたフラクタル次元と同じ大きさのフラクタル次元を有する亀裂モデルにパーコレーション・モデルを適用すれば、より現実的な貯留層のシミュレーションが実現できる可能性がある。

そこで本論文では、まずフラクタル幾何学の適用に関する岩盤力学や地震学の分野の従来の研究を概観する。そのうち、震源分布を模擬した点の分布モデルを用いてフラクタル次元の適用に対する基礎的な検討を行い、この問題に対するフラクタル次元の誤差範囲と信頼性の限界を検討する。そしてその結果に基づき、(財)電力中央研究所が雄勝地点で実施した高温岩体発電実験のAE震源分布のフラクタル次元を求め、造成された貯留層の性状の評価を試み、その有用性と問題点を明らかにする。

## 2. フラクタル幾何学の適用に関する従来の研究と本研究の位置づけ

岩盤力学分野へのフラクタル幾何学の適用は、すでにさまざまな観点から試みられている<sup>4)</sup>。典型的な例は、岩盤破壊面の形状評価への適用であり、Brown and Scholz<sup>5)</sup>が現場と室内で20 mから約1 mわたる波長の岩盤破壊面の形状を測定してそのフラクタル性とフラクタル次元について研究したのをはじめとして、数多くの論文(例えば文献6),7),8))が発表されている。また、岩盤浸透流のモデルとしても注目され<sup>9)</sup>、フラクタル幾何学に基づいてコンピュータで作成した亀裂モデルを、フラクタル次元や亀裂密度を用いて現実の亀裂網と比較する研究や<sup>10)</sup>、フラクタル次元などを定めた亀裂モデルに対して圧力の時間変化を計算しこれを現実の圧力変化と比較・検討する研究<sup>11)</sup>などもなされている。これらの研究成果に注目して、わが国では平成5年度から7年度にかけて、地熱開発に関連した文部省科学研究費補助金による重点領域研究「フラクタルと抽熱」が行われた。この研究プロジェクトでは、フラクタル幾何学を岩盤破壊問題へ適用する研究が多くの研究者が参加してさまざまな観点から推進され<sup>12)</sup>、現在この研究成果の各種学術雑誌への投稿が進められている。

一方地震学の分野では、地震の震源分布のフラクタル次元を求めて、地震の発生機構の解明や予知に利用する研究がなされている。たとえば、Kagan and Knopoff<sup>13)</sup>は震源分布がフラクタル性を有すること、浅部地震と深部地震でそのフラクタル次元が異なることを明らかにし、Sadovskiyら<sup>14)</sup>は世界規模での震源分布と1辺数10 kmの一定地域内の震源分布のフラクタル次元を比較して、その違いを議論している。またHirataら<sup>15)</sup>は、岩石供試体の3軸クリープ試験を行い、AEの震源がランダムな3次元分布から最終的な破壊面に2次元的に集中して巨視的破壊に至ることを、AEの震源分布のフラクタル次元の経時変化を用いて示した。そしてこのことに基づいて、微小地震の震源分布のフラクタル次元の経時変化が大規模な地震の発生の予知に役立つ可能性を示している。

これらのことから、地熱貯留層造成時のAE震源分布のフラクタル次元を求めれば、造成された貯留層の形状が2次元的であるか3次元的であるかを定量的に評価できる可能性がある。また、経時的なフラクタル次元の変化を求めて、これを水圧破碎時の圧力や流量、岩盤内の地圧、あるいは、既存節理や断層の方向などの地質状態と比較すれば、水圧破碎

によって造成される亀裂の進展メカニズムについても新たな情報が得られる可能性がある。そこで次に、AEの震源分布を模擬した点の分布モデルを用いて、フラクタル次元の適用に対する有用性と問題点の検討を行う。

## 3. フラクタル次元の解析法と基本モデルによる検討

### (1) フラクタル次元の解析法と基本モデル

フラクタル次元を求める方法としては、ボックス・カウンティング法やディバイダ法が一般的である。しかし点の空間分布に対しては、これらの方法よりも相関関数法を用いる方が簡便と思われるので、ここではHirata<sup>15)</sup>やGrassberger<sup>16)</sup>にならい、相関関数法を用いることにした。なお、フラクタル次元は計算法によりその値が異なるのがむしろ一般的であり、どの計算法がこの種の問題に適するのかの検討は、今後のひとつの研究課題といえる。

さて、相関関数法では、次式で定義される相関積分 $C(r)$ を用いる。

$$C(r) = 2n/N(N-1) \quad (1)$$

ただし、

N: 解析対象とするAE震源の総数、

r: 設定距離、

n: AE震源2点間の距離がrより小さいAE震源ペアの個数

である。ここで、AEの震源分布がフラクタル性を有するならば次の関係が成立し、係数Dの値がフラクタル次元を表す<sup>15),16)</sup>。

$$\log(C(r)) = D \cdot \log(r) + k \quad (2)$$

次に、このことを具体的な例を用いて説明する。

図-1(a)は、X軸に平行な長さ100の線分上に41個の点を等間隔にならべた点の分布を示している。この点の分布に対し、rとC(r)の関係を求め、両対数軸のグラフ上にプロットしたのが図-2の●印の点である。ここにrは、点の間隔2.5よりも少し大きな値となるよう、2.5の1.1倍の値 $a=2.75$ を初期値とし、 $r=a, 2^1a, 2^2a, 2^3a, \dots$ と、対数軸上で等間隔になるようにrの値を2のべき乗で増大させている。rが線分の長さである100を越えると、すべての点の2点間の距離がrより小さくなるため、定義より $n=N(N-1)/2$ となり、 $C(r)=1$ で一定となる。したがって、rが100の値を越えたところでC(r)の計算を打ち切っている。この両対数軸上のグラフで、rとC(r)の関係が直線性を有するとき、点の分布はフ

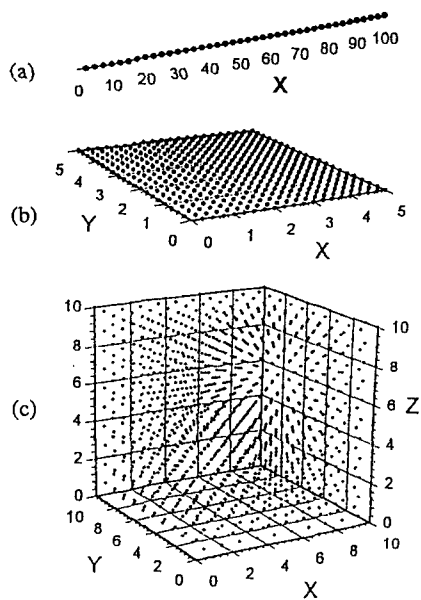


図-1 等間隔の点の分布モデルの例

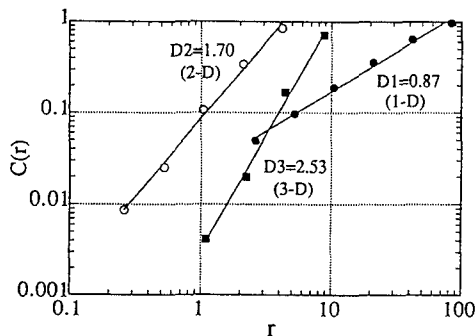


図-2 等間隔の点の分布モデルに対するフラクタル次元

ラクトル性を有すると判断され、その傾き  $D$  の値がフラクタル次元を与える。この場合、図のように回帰直線を求めると、その傾きは 0.87 となり、この値がこの点の分布に対するフラクタル次元を与える。図-1(b)は、長さ  $5 \times 5$  の  $XY$  平面上に  $X$  方向、 $Y$  方向に等間隔に合計 441 個の点を分布させたモデルである。この場合の  $r$  と  $C(r)$  の関係は図-2 に○印で示すようであり、フラクタル次元は 1.70 である。図-1(c)は、座標軸に平行な一辺の長さ 10 の立方体中に、 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  の 3 方向に等間隔に合計 1331 個の点を分布させたモデルである。この場合の  $r$  と  $C(r)$  の関係は図-2 に■印で示すようであり、フラクタル次元は 2.53 である。

なお、このような点の分布モデルのフラクタル次元を求める際には、次のような手順に従うこととした。すなわち、図-2 と同様の両対数グラフ上で

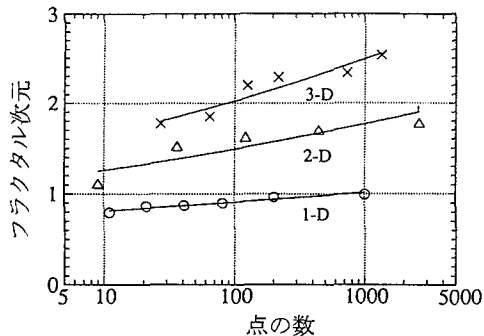


図-3 点の数の変化に伴うフラクタル次元の変化 (等間隔分布の場合)

ず  $C(r) > 0.99$  である右端 ( $r$  が最大) の点を除き、回帰直線を求める。この回帰直線に対する相関係数が 0.98 より大きければ、回帰直線が十分な精度で近似されたと考え、この回帰直線の傾きをフラクタル次元とする。もし、この相関係数が 0.98 より小さければ、残された点のうち図中で右端 ( $r$  が最大) もしくは左端 ( $r$  が最小) の点を取りのぞいて再度回帰直線を求め、相関係数が 0.98 以上になるまでこの操作を繰り返す。図-2 に示した 3 例では、右端の点が  $C(r) < 0.99$  であったためそのまま回帰直線を求めたところ、相関係数はいずれの場合も 0.997 となって条件を満足し、1 回の操作でフラクタル次元を決定することができた。以下に述べる点の分布モデルに対してもすべてこの方法を用いたが、通常 1 回、多くても 3 回程度の繰り返しで条件を満足し、フラクタル次元を求めることができた。

## (2) フラクタル次元に対する点の密度の影響

直線のフラクタル次元は、理論的にはユークリッド次元と同じく 1 である。図-1(a)の点の分布のフラクタル次元が 0.87 と 1 を下回ったのは、線分上の点の数  $N$  が 41 個と有限の値で線分上に点が完全に充填されていないためであり、点の数が無限大であればフラクタル次元は 1 に一致するはずである。図-1(b)、図-1(c)の点の分布に対するフラクタル次元が 1.70、2.53 とそれぞれ対応するユークリッド次元 2、3 より小さいのも同じ理由と思われる。

これを確かめるために、点の分布密度、すなわち、同じ範囲に分布する点の数を変化させた場合のフラクタル次元を求めた。その結果を図-3 に示す。例えば、○印で示した線分上に点を等間隔に分布させた 1 次元モデルの場合には、点の数  $N$  が 1001、201、81、41、21、11 と減ると、得られるフラクタル次元

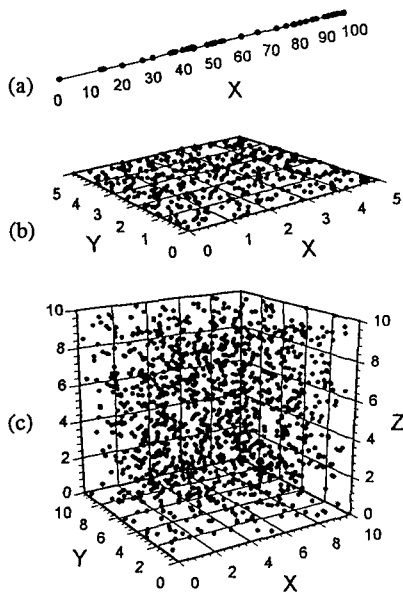


図-4 ランダムな点の分布モデルの例

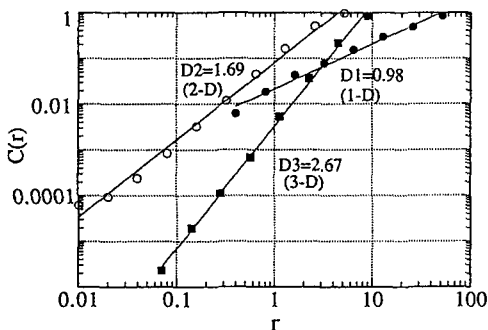


図-5 ランダムな点の分布モデルに対するフラクタル次元

は 0.98, 0.97, 0.90, 0.87, 0.87, 0.8 と、単調に減少する傾向がみられる。この傾向は、△印で示した 2 次元 (平面) の場合や ×印で示した 3 次元 (立方体) の場合にも共通している。このことは、AE 震源分布に対して求めたフラクタル次元から地熱貯留層の性状を推定する場合、AE 震源の分布密度を考慮する必要を示唆している。しかし、実際に解析の対象とする AE の震源は等間隔の分布ではなく、ランダムな分布である。そこで乱数を用いたランダムな点の分布に対して、同様な検討を行った。なお、乱数はそのときの時刻を秒単位で表して数値に変換し、その数値を乱数列の種 (シード) としてパーソナル・コンピュータ上で発生させたものであり、同一の乱数の組が表れる確率は  $2^{15}$  (=32768) 分の 1 と極めて小さい。

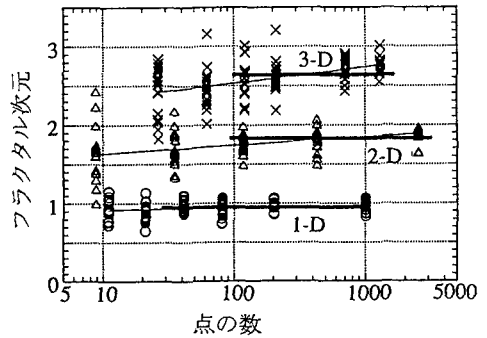


図-6 点の数の変化に伴うフラクタル次元の変化 (ランダム分布の場合)

図-4(a)は、図-1(a)と同じ X 軸に平行な長さ 100 の線分上に同じ 41 個の点を、等間隔ではなくランダムに分布させた場合を示している。ここでは、0~100 の範囲に一樣な乱数を発生させ、この乱数の値を順に点の X 座標に割り当てることにより点をランダムに分布させた。図-4(b), (c)は、同様にそれぞれ X, Y 座標, X, Y, Z 座標に乱数を割り当てて作成した図-1(b), (c)に対応するランダムな点の分布モデルである。図-5 の ●○■ の 3 つの印は、それぞれ図-4(a), (b), (c)の点の分布に対する  $r$  と  $C(r)$  の関係である。それぞれ、フラクタル次元は 0.98, 1.69, 2.67 であることがわかる。

さて次に、等間隔の場合と同様に、ランダム分布の点の数  $N$  を変化させてフラクタル次元を求めた結果が図-6 である。ひとつの解析ケース毎に乱数を変えて 20 個のモデルの解析を行った。このため、同一の点数に対し同じシンボルが 20 個ずつプロットされている。○印は 1 次元 (線分), △印は 2 次元 (平面), ×印は 3 次元 (立方体) モデルの解析結果である。図中の細い実線は、各解析ケースの 20 個のモデルの平均値に対して回帰直線を求めたものであり、図-3 と同様の右上がりの傾向、すなわち、AE 震源の分布密度が増大するにつれて、フラクタル次元が増大する傾向が認められる。しかし点の数が多き場合には、この傾向はやや緩和されるように思われる。横軸に平行な太い線分は、1 次元 (線分), 2 次元 (平面), 3 次元 (立方体) の解析において、それぞれ点の数が少ない 2 ケースの解析結果を除いて、他の解析結果すべてを平均した値を示している。たとえば 1 次元の場合の線分は、 $N=11$  と  $N=21$  の場合を除き、 $N=41, 81, 201, 1001$  の 4 ケース合計 80 モデルに対して得たフラクタル次元の平均値  $D=0.96$  を示している。同様に 2 次元モデルの場合は、 $N=9, 36$  の 2 ケースを除いた 3 ケース 60 モデルに

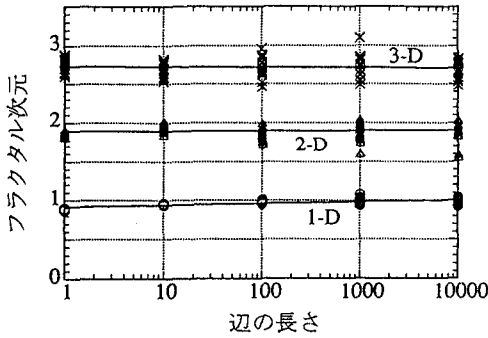


図-7 点の数が500個一定で、点の分布範囲の1辺の長さが変化する場合のフラクタル次元の変化(ランダム分布の場合)

対する平均値  $D=1.83$  を、3次元モデルの場合は、 $N=27,64$  の2ケースを除いた4ケース80モデルに対する平均値  $D=2.69$  を示している。これらの線分をそれぞれの横軸の範囲の解析結果を代表する値とみなしても、それほど違和感のないことがわかる。したがって、点の数がある程度多くなる、例えば3次元の場合は100点以上になれば、点の分布密度がフラクタル次元に与える影響はあまり大きくはないように思われる。

点の分布密度の影響をさらに検討するため、この解析とは逆に点の数を500個で一定とし、分布させる線分、平面、立方体の大きさを変化させてフラクタル次元を求めた。その結果を図-7に示す。この図の横軸は点を分布させた線分、平面、立方体の1辺の長さであり、図中の実線は、図-6と同じく各解析ケースの20個のモデルの平均値に対する回帰直線である。この図から、1辺の長さが1から10000に増大して点の分布密度が低下しても、いずれの場合もほとんどフラクタル次元が変化せず一定であることがわかる。点の分布密度の影響があれば1辺の長さの増大にともなってフラクタル次元は減少するはずであるから、少なくとも点の分布がランダムである場合には点の分布密度は無視できる程度であるといえよう。

一方、図-6や図-7、とくに図-6をみると個々の解析ケースにおけるばらつきが大きく、これがむしろ点の分布密度より実用上問題かもしれない。しかしこの個々の解析ケースのばらつきも、図-6をみると点の数が多くなるにつれて小さくなる傾向がみられ、1, 2, 3次元のいずれの場合も点の数が1000を越えるとばらつきがかなり小さくなっている。

以上のことから、AE震源分布のフラクタル次元から地熱貯留層の性状を推定する場合、解析対象とす

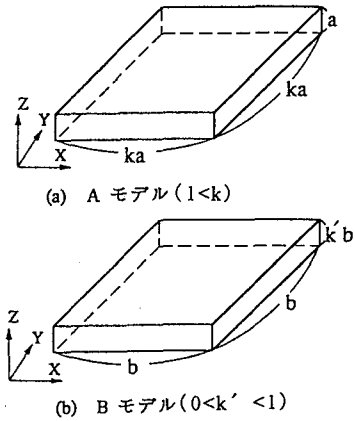


図-8 2つの点の空間分布モデル

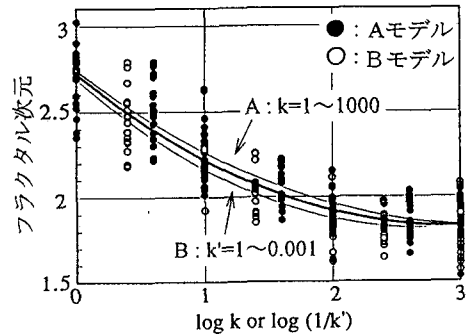


図-9 空間分布モデルの底面の長さとの高さの比  $k$  または  $k'$  とフラクタル次元の関係

るAEの震源数はできるだけ多いことが望ましく、図-6の3次元の場合を参考にすれば少なくとも100点以上、できれば1000点以上であることが望ましいといえよう。

#### 4. 点の空間分布の形状とフラクタル次元

AE震源分布のフラクタル次元から貯留層の形状を評価するためには、点の分布形状とフラクタル次元との関係を、ある程度定量的に確かめておくことが望ましい。そこでまず図-8(a)に示す底面が一辺  $ka$  の正方形で高さが  $a$  の正四角柱Aを考え、その内部に点をランダムに分布させたモデルを考えた。正四角柱Aは、 $k=1$  のとき立方体であり、 $k$  が1より大きくなると扁平な正四角柱になる。ここでは、点が3次元分布する場合と2次元分布する場合で、フラクタル次元がどの程度変化するかを検討を目的としたが、Aモデルで  $k$  を1から0に近づけると正四角柱は棒の形状に近づき、内部に分布している点は

2次元ではなく1次元分布に近づく。そこで、次に図-8(b)に示す底面が一辺  $b$  の正方形で高さが  $k'b$  の正四角柱  $B$  を考えた。正四角柱  $B$  は、 $k'=1$  のときは立方体であるが、 $k'$  が1より小さくなる扁平となり、内部の点の分布は2次元分布に近づく。なお、 $A$  の場合は扁平になるにつれて体積が大きくなるのに対し、 $B$  の場合は扁平になるにつれて体積が小さくなる点に違いがある。すなわち、正四角柱内部に分布させた点の数が同じであれば、 $A$  の場合は扁平になるにつれて点の分布密度が減少する(希薄になる)のに対し、 $B$  の場合は逆に分布密度が大きくなる(密になる)。

さてモデルの作成にあたり、正四角柱の底面の2辺は  $X, Y$  軸に、高さ方向は  $Z$  軸に一致するものとし、ふたつの正四角柱の  $a, b$  の値はいずれも1000とした。そして、正四角柱の形状が立方体の場合には、0~1000の範囲で様な乱数を発生させ、これを  $X, Y, Z$  の3座標を順に割り当てることにより、ランダムな点の分布をモデル化した。分布させた点の数ほどの場合にも200個で一定である。正四角柱  $A$  では  $k \geq 1$  の解析を行うものとし、この場合、 $Z$  座標は0~1000の範囲とし、 $X, Y$  座標は0~1000の範囲の乱数に  $k$  を乗じ、0~1000 $k$  の範囲とした。正四角柱  $B$  では  $0 < k' \leq 1$  の解析を行うものとし、 $X, Y$  座標は0~1000の範囲し、 $Z$  座標を0~1000 $k'$  の範囲とした。正四角柱  $A$  の場合には、 $k=1, 4, 10, 40, 100, 400, 1000$  の7ケースを、正四角柱  $B$  の場合には  $k'=1.0, 0.4, 0.1, 0.04, 0.01, 0.004, 0.001$  の7ケースを解析した。

図-9は横軸  $X$  に  $\log(k)$  または  $\log(1/k')$  をとり、縦軸  $Y$  にフラクタル次元をとって、解析結果を示したものである。●印が正四角柱  $A$  ( $k=1 \sim 1000$ ) に対する結果を、○印が  $B$  ( $k'=1 \sim 0.001$ ) に対する結果を示す。ひとつの解析ケースに対し乱数を変えて20個のモデルを解析したため、同一の  $k$  または  $k'$  の値に対し同じシンボルが20個ずつプロットされている。正四角柱  $A$  と  $B$  のそれぞれの結果を2次曲線で近似すると、図中の2本の細い実線が得られる。 $A$  の場合の方が  $B$  の場合に比べて点の分布密度が小さい(希薄である)のに、近似曲線の値がすべての範囲で大きいのは、線分、平面や立方体に等間隔で点を分布させた場合の傾向と逆である。これは、すでに議論したように点の分布密度の影響は小さく、それよりも、乱数の組の違いによる影響が大きいことを示していると思われる。次に、乱数の組の違いによるフラクタル次元の違いを、まず最もばらつきが大きな正四角柱  $A$  の  $k=4$  ( $\log(k)=0.602$ ) の場合で評価を試みる。この場合、平均値  $m$  は2.51、標準偏差  $s$  は0.18であるから、正規分布に従うとすれば、算

出されたフラクタル次元が  $m \pm 1.209s$  の範囲、すなわち、2.29から2.74(その差0.45)の範囲の値となる確率は80%である。これは最もばらつきが大きな場合である。最もばらつきが小さな  $k'=0.004$  ( $\log(1/k')=2.398$ ) の場合には、平均値1.82、標準偏差0.098であるから、最もばらつきが大きい場合の0.45の半分程度の0.24の範囲、すなわち、1.70から1.94の範囲にフラクタル次元の値が得られる確率が80%となる。また、正四角柱  $A$  の  $k=1000$  ( $\log(k)=3$ ) と  $B$  の  $k'=0.001$  ( $\log(1/k')=3$ ) の場合には、モデルは異なるが同じ扁平度の正四角柱の内部に点が分布していることになる。この場合は、両者を合わせて平均値1.85、標準偏差0.16であるから、0.33の範囲、すなわち、1.68から2.01の範囲にフラクタル次元が得られる確率が80%となる。このように、点が同じ範囲に分布していても点の分布の仕方によってフラクタル次元はある程度ばらつき、その範囲は80%程度の確率を目安にすれば、0.24から0.48程度の範囲でばらつくといえる。

上述のばらつきはけっして小さいとはいえないが、図-9で横軸が大きくなる、すなわち、点の分布する範囲が扁平になれば、フラクタル次元が小さくなる傾向は顕著である。したがって、フラクタル次元の大きさは、点の分布形状の目安になることは間違いないといえる。図中の太い実線は、 $A$  と  $B$  のふたつのモデルを区別することなく、全解析結果を最も単純な曲線近似として2次曲線で近似したものであり、横軸を  $X$ 、縦軸を  $Y$  とすれば、 $Y=0.1042X^2-0.6101X+2.7208$  と表わされる。この曲線は、フラクタル次元の大きさから点の分布形状を推定する場合に、ひとつの目安になると思われる。

## 5. 高温岩体地熱貯留層評価への適用

(財)電力中央研究所は、秋田県雄勝地点において高温岩体の熱抽出実験を行っている。そこで、この実験の亀裂造成に伴って発生した  $AE$  の震源分布のフラクタル次元を求め、その貯留層評価への適用の可能性を議論する。まず実験の概要について述べ、ここで行われた2回の亀裂造成実験の結果を比較する。次に、これらの亀裂造成に伴って発生した  $AE$  の震源分布のフラクタル次元を求め、地質状態などと比較して議論を行う。また、水の累積注入流量  $Q$  と  $AE$  震源の分布範囲の平均長さ  $U$  の関係を  $Q = \alpha U^E$  の式で表し、この式の指数  $E$  の値を実験結果から求めて、これを先に求めたフラクタル次元と比較検討する。さらに、 $AE$  震源分布のフラクタル次元の経時変化を明らかにし、その結果から亀裂の進展挙動に

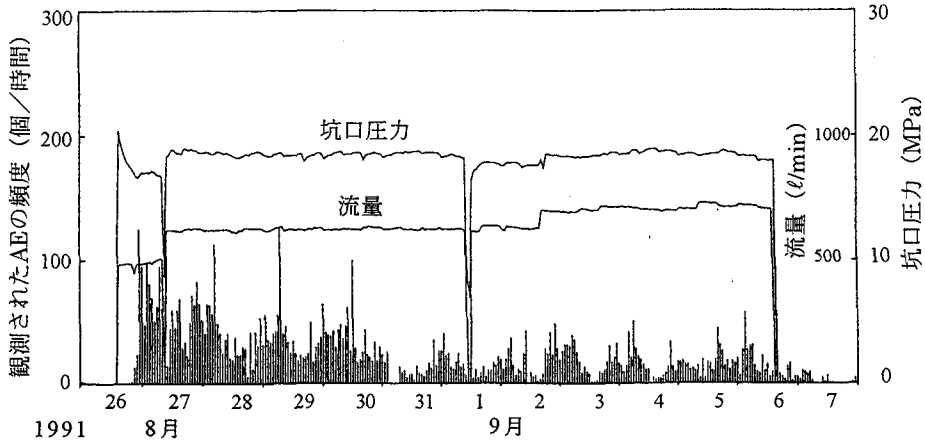


図-10 1 段目亀裂拡大水圧破碎時の流量・坑口圧力・観測された AE の頻度<sup>17)</sup>

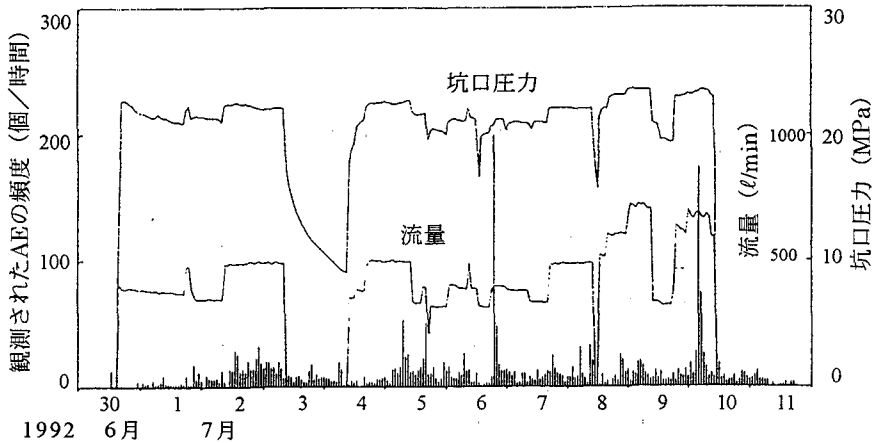


図-11 2 段目亀裂拡大水圧破碎時の流量・坑口圧力・観測された AE の頻度<sup>17)</sup>

ついて推論を試みる。

(1) 雄勝高温岩体実験の概要<sup>17), 18)</sup>

雄勝地点の地質は、地表から約 77m までが地表堆積物、その下部が火砕岩類で、深度 300m からは花崗閃緑岩からなり、深度 1000m では 228°C の岩盤温度が測定されている。また、ボーリング・コアで調べたコア 1m あたりの既存亀裂の本数は、概ねどの深度でも 10~20 本程度であり、全体に既存割れ目の発達した岩盤である。

この地点では、同一の坑井で深度を変えて 1991 年と 1992 年にそれぞれ 1 箇所、合計 2 箇所得水圧破碎による貯留層の造成が行われた。1 段目の破碎では、坑口から深度 990m の坑底部までケーシング・パイプを挿入してフルホール・セメンティングした後、坑底部で 10m の追加掘削を行い、その部分だけを裸坑として全坑に水圧を加え、亀裂の造成を行った。この場合、深度 990m~1000m の裸坑部にだけ岩

盤に直接水圧が作用するため、この部分から岩盤中に亀裂が進展した。2 段目の破碎では、まず同一の坑井の深度 711~719m の 8m 区間のケーシング・パイプを切削してこの部分を裸坑とするとともに、1 段目の亀裂造成を行った坑底部に水圧が作用しないように坑底から深度 860m まで砂を充填した。そしてその後、全坑加圧を行って、裸坑部とした深度 711~719m の区間で亀裂造成を行った。図-10 と図-11 に 1 段目と 2 段目の亀裂造成時の流量、坑口圧力、観測された AE の頻度を示す。

1 段目の亀裂造成では 1642 個の AE 震源が、2 段目では 1057 個の AE 震源が決定された。XY 平面、YZ 平面、XZ 平面への投影図を図-12、図-13 に示す。これらの図において、X と Y は坑口の位置を 0 とし、それぞれ東と北をその正方向とし、Z は破碎区間の中心深度を 0 とし、上向きに正をとっている。1 段目の水圧破碎で造成された亀裂は、図-12 の AE 震源の分布や流電電位法による電気探査の結

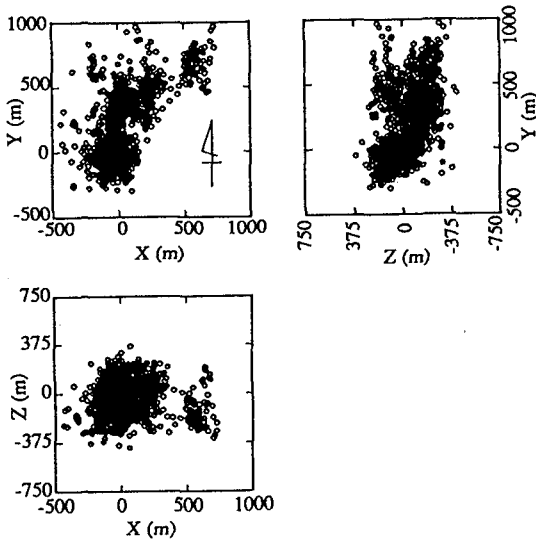


図-12 1段目の亀裂造成(1991年)に伴う全AE震源の投影図 (X=Y=0は坑口位置, Z=0は破碎区間の中心深度995m)

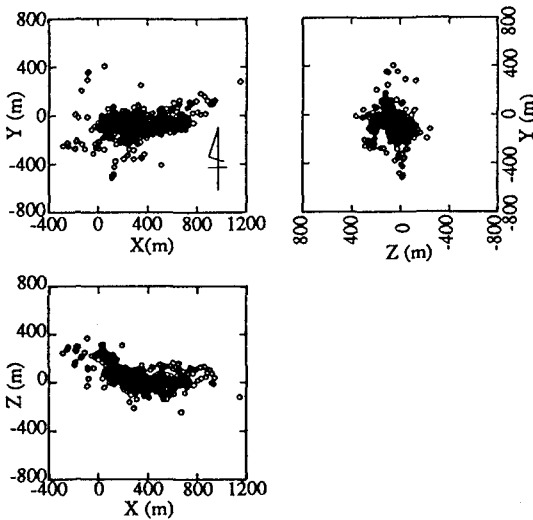


図-13 2段目の亀裂造成(1992年)に伴う全AE震源の投影図 (X=Y=0は坑口位置, Z=0は破碎区間の中心深度715m)

果などから、水平面 (XY 面) 上で  $N20^{\circ}E$  に長軸を持つ楕円形にひろがり、長軸方向へは約 1000m、短軸方向へは約 500m、厚みは 200m と判断された。2 段目で造成された亀裂は、破碎坑より東側にだけ進展し、水平面 (XY 面) 上でおおよそ  $N100^{\circ}E$  に長軸を持つ楕円形にひろがり、長軸方向へは約 800m、短軸方向へは約 400m、厚みは 200m と判断された。

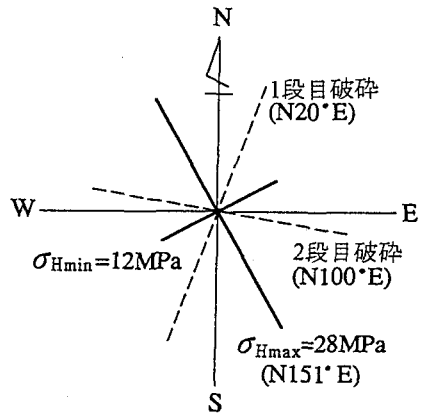


図-14 AE法による水平面内の地圧測定結果と水圧破碎による亀裂の造成方向<sup>18)</sup>

一方当地点では、破碎坑の深度 919m 位置のボーリング・コアを用いて、AE 法により水平面内の地圧状態が測定されている。その結果を図-14 に示す。回収したボーリング・コアから水平面内で  $45^{\circ}$  間隔の 4 方向に各 10 個程度供試体を作製して載荷試験を行い、AE のカイザー効果に基づいてこの 4 方向の地圧の直応力の大きさを推定した。その結果から、水平面内の地圧の最大及び最小主応力の大きさはそれぞれ 28MPa、12MPa であり、最大主応力の方向は  $N151^{\circ}E$  とされた。この深度 919m 位置のコアに対する測定以外、初期地圧測定は行われていないので、この結果を深度 990~1000m の 1 段目、深度 711~719m の 2 段目の水圧破碎と比較すると、造成された亀裂の水平面内での進展方向 (走向) は、1 段目は  $N20^{\circ}E$ 、2 段目は  $N100^{\circ}E$  であり、地圧測定結果の最大水平地圧の方向とはいずれも一致していない。

また当地点では、亀裂の造成に先立ち BHTV (ボアホール・テレビュア) を用いて破碎坑坑壁の亀裂調査を行った。調査時点で坑口から深度 500m まではケーシングがなされており、調査を実際に行ったのは、500~980m の区間である。この調査結果を、1 段目の亀裂造成区間である坑底部の 990~1000m 間に近い 800~980m 区間と、2 段目の亀裂造成箇所 (深度 711~719m) を中心とする 600~800m 区間に区分し、既存割れ目の方位のコンター・ダイアグラムに表したのが図-15 と図-16 である。両者を比較すると、割れ目の方向性に顕著な違いが認められる。図-15 の A のピークで代表される既存割れ目の方向は、この区間のうち 917~947m の間から回収されたコアで調べても幅 1mm 以上の充填物を挟在する既存割れ目の割合が大きい。A のピークは走向  $N29^{\circ}E$ 、傾斜  $62^{\circ}W$  であるから、傾斜はともかく少なくとも



表-1 1段目と2段目の亀裂造成の比較<sup>17)</sup>

		1段目	2段目
亀裂造成期間		1991年8月26日～9月6日	1992年6月28日～7月11日
破碎深度		990～1000 m	711～719 m
加圧区間の岩盤の平均温度		228 °C	165 °C
AE震源分布から推定した破碎面の広がり		1000×500×200 m	800×400×200 m
破碎面の進展方向		N20° E	N100° E
破碎区間の事前調査		坑底部の追加掘削ため既存の割れ目が多かったが、そのままその区間で破碎を実施	ボーリングコアと電気検層結果から既存の割れ目の少ない場所を選定して破碎を実施
破碎区間の平均固有透水係数*	亀裂造成前	$3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$	$1 \times 10^{-16} \text{ m}^2$
	亀裂造成後	$1 \times 10^{-13} \text{ m}^2$	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$
平均坑口圧力 (破碎深度での平均圧力)		19 MPa (約 29 MPa)	22 MPa (約 29 MPa)
平均圧入流量		650 l/min	500 l/min
圧入した水の総量		10,160 m <sup>3</sup>	5440 m <sup>3</sup>
亀裂造成後の戻り水の割合		6% (640 m <sup>3</sup> )	25% (1,346 m <sup>3</sup> )
戻り水の最高温度		64.4 °C	64.0 °C
戻り水の最終的なCl濃度		63.2 ppm	8.8 ppm

\* 固有透水係数：水温に関係なく岩盤の幾何学的条件のみによって定まる固有の透水係数で単位はm<sup>2</sup>

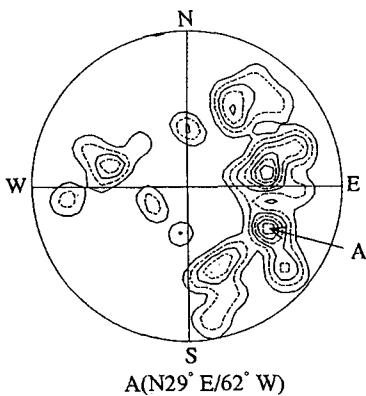


図-15 1段目の亀裂造成深度に近い、破碎坑800～980m区間の既存割れ目の方位のカウンター・ダイアグラム<sup>18)</sup>。(ウルフ網下半球投影)

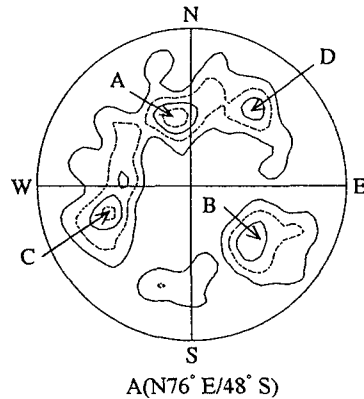


図-16 2段目の亀裂造成深度を含む、破碎坑600～800m区間の既存割れ目の方位のカウンター・ダイアグラム<sup>18)</sup>。(ウルフ網下半球投影)

その走向は、図-12のAEの震源分布などから推定された水圧破碎による亀裂の進展方向のN20°Eと概ね一致している。第2段目の亀裂造成箇所(深度711～719m)を中心とする600～800m区間では、図-16に示すようにA,B,C,Dの4点に既存割れ目の方向の集中が認められる。706～727mから回収されたコアを調べたところ、Dを除くA,B,Cの3方向にはコアにおいても既存割れ目の集中が認められ、このうち東西系のA方向は他の2方向のものより幅1mm

以上の充填物を挟在する既存割れ目の割合が大きいたことがわかった。このAの方向は走向N76°E、傾斜48°Sであるから、その走向は図-13のAE震源分布などから推定された破碎坑からほぼ東(N100°E)に伸びた亀裂の進展方向とほぼ一致している。したがって、1段目も2段目もこれらの既存割れ目の方向に沿って、亀裂が進展したと思われる。

表-1は、亀裂造成の諸条件を1段目と2段目で比較したものである。この表から次の5点で、1段

目の亀裂造成は2段目より既存割れ目の影響をより強く受けているといえる。

(a) 1段目の破碎では、坑底部の追加掘削により破碎区間を設けた。このため、ボーリング・コアの観察により既存の割れ目が多いことが確認されたが、破碎区間を変更することはできず、そのままこの区間で破碎を行った。しかし2段目では、ボーリング・コアの割れ目本数が周囲よりもなるべく少ないこと、電気検層によりなるべく高比抵抗であることを条件に、既存亀裂の少ない箇所を破碎区間に選定した。

(b) 亀裂造成前の破碎区間の固有透水係数は、1段目が  $3 \times 10^{-15} \text{m}^2$ 、2段目が  $1 \times 10^{-16} \text{m}^2$  と1段目の方が2段目よりも大きい。

(c) 水圧破碎時の平均坑口圧力が1段目は19MPa、2段目は22MPaで、破碎深度までのヘッドを考慮すれば破碎位置ではいずれも29MPaと同じであるが、平均圧入流量が1段目が650ℓ/min、2段目が500ℓ/minと、1段目の方が多い。

(d) 圧入した水の総量と戻り水の量をみると、1段目では圧入した水の総量10160m<sup>3</sup>の6%の640m<sup>3</sup>しか戻り水がない。これに対し、2段目では1段目の約半分の5440m<sup>3</sup>しか水を圧入していないのに、1段目の2倍の1346m<sup>3</sup>の戻り水がある。これは1段目の破碎の場合には、既存割れ目を通じた逸水が2段目より多く生じていることを意味していると思われる。

(e) 戻り水の最終的なCl濃度は、1段目の戻り水の方が2段目より高い。戻り水のCl濃度が高いのは、既存割れ目にあった水が戻り水に多く混入したためと判断される<sup>19)</sup>。したがって、1段目に造成された亀裂の方が、2段目それよりも既存割れ目と結合して進展した割合が大きいと思われる。

## (2) 2つの破碎のAE震源分布に対するフラクタル次元とその比較

図-17に、図-12に示した1段目のAE震源分布に対する $r$ と $C(r)$ の関係を示す。図-18は2段目のAE震源分布に対する同様の図である。フラクタル次元を求める際には検討対象とする大きさの上限と下限に注意する必要がある。そこで、フラクタル次元を求める際の式(3)における設定距離 $r$ の上限については、造成された亀裂の厚み200mを目安に $r=2^8=256\text{m}$ とした。下限については、破碎坑の坑底付近で発破を行ってその震源を求めたところ、AEの震源決定精度は10~20mと推定されたため、これを参考に $r=2^3=8\text{m}$ とした。次にこの $r=8\text{m}$ を初期値 $a$ とし、 $r=a, 2^1a, 2^2a, 2^3a, \dots$ と、対数軸上で等間隔になるように便宜的に $r$ の値を2のべき乗で増大させた。そして、対応する $C(r)$ の値を求め、 $8 \leq r \leq 256$ の範

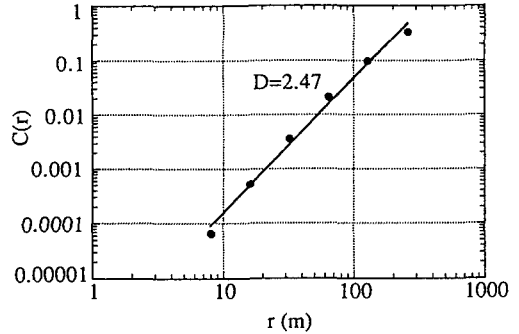


図-17 1段目の亀裂造成に伴う全AE震源分布のフラクタル次元

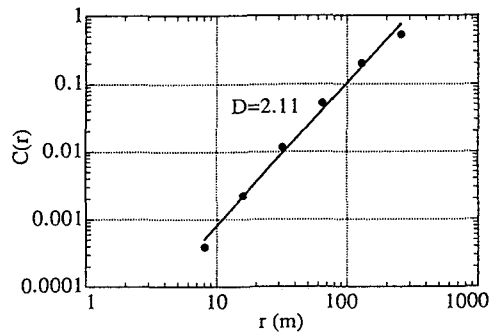


図-18 2段目の亀裂造成に伴う全AE震源分布のフラクタル次元

囲で $r$ と $C(r)$ の回帰直線を求め、回帰直線に対する相関係数が0.985より大きければこの回帰直線の傾きをフラクタル次元とした。図-17と図-18の回帰直線はこの条件を満足したが、このあと述べる解析ではこのようにして求めた回帰直線の相関係数が0.985より小さい場合があり、その場合には $r=8\text{m}$ を、それでも条件を満足しない場合にはさらに $r=16\text{m}$ の点を除外して再度回帰直線を求めた。

図-17、図-18より、1段目の亀裂造成に伴うAE震源分布のフラクタル次元は2.47、2段目のそれは2.11であることがわかる。解析対象とした震源が正四角柱の中に分布していると仮定して、これらのフラクタル次元に対応する正四角柱の底面の1辺の長さに対する高さの比 $k$ を、図-9の曲線を参照して求めると、それぞれ $k=2.78$ 及び $k=19.1$ となる。したがって、1段目の亀裂造成に伴うAEの震源分布は2段目のそれよりかなり3次的であるといえる。このことは、1段目の亀裂造成は2段目より既存割れ目の影響を大きく受けているとの表1の比較結果と調和的と思われる。すなわち、1段目の亀裂造成

では、破碎区間に存在する多数の既存割れ目の影響を受けて造成された亀裂が3次的に発達したのに対し、2段目の亀裂造成では1段目に比べて亀裂の進展に影響を与える既存割れ目の数が少なく、最も影響の大きな既存割れ目の卓越方向に選択的に亀裂が発達し、1段目に比べて平面的な亀裂の造成がなされたのではないかと推測される。

### (3) 圧入流量とAE震源の空間分布の関係とフラクタル次元の比較

つぎに、フラクタル次元と類似した別の概念を導入し、フラクタル次元と比較して議論を行う。図-19は、1段目の亀裂造成時の水の圧入流量の累積値 $Q$ を縦軸にとり、圧入開始からそのときまでのAE震源の空間分布の広がり $U$ を横軸にとって、両対数グラフ上にプロットしたものである。また図-20は、2段目の亀裂造成時についての同様の図である。これらの図の横軸 $U$ の値はAE震源の空間分布を楕円体で近似し、この楕円体の長軸、短軸及びこの2軸に直交する軸の方向への震源分布の広がりを長さとして求め、これらの3方向の長さの平均値を $U$ の値とした。さて、圧入した水がその圧入点から均質等方に岩石を破碎しながら球状に広がり、この岩石の破碎に伴ってAEが均等に発生すると仮定すれば、AE震源の分布は球状に広がり、 $Q = \alpha U^3$ の関係があると思われる。ここに比例定数 $\alpha$ は、岩石がまったく空間に水を圧入する場合には $4\pi/3$ であるが、岩石中に水を圧入する場合には $\alpha$ は空隙率に反比例した量となり、 $4\pi/3$ よりはるかに大きな定数になるとと思われる。 $Q = \alpha U^3$ の両辺の対数をとれば、 $\log(Q) = E \cdot \log(U) + \log(\alpha)$ となり、このとき $E=3$ である。一方、圧入した水が板状に岩石を破碎しながら広がれば、 $Q = \alpha U^2$ の関係があると思われる。この場合 $\alpha$ は、造成された亀裂の開口幅に反比例すると思われる。この場合も、両辺の対数をとればやはり、 $\log(Q) = E \cdot \log(U) + \log(\alpha)$ で表され、 $E=2$ となる。したがって、両対数グラフ上に $U$ と $Q$ の関係を直線で近似したときその傾き $E$ は、図-17、図-18において $r$ と $C(r)$ の関係から求めたフラクタル次元 $D$ に対応するものと思われる。図-19、図-20は、このような観点から $U$ と $Q$ の関係に対して回帰直線を求めたものである。図-19の①は累積圧入流量 $Q$ の1000から10000 $m^3$ の全点に対して、②はこのうち $Q$ の値の大きな右上の3点をはずして回帰直線を求めたものである。直線の傾き $E$ は、①の場合は $E=3.64$ 、②の場合は $E=6.99$ である。このように、傾きが3あるいは2からかけ離れた大きな値となったのは、圧入した水の圧力が既存割れ目に充填され

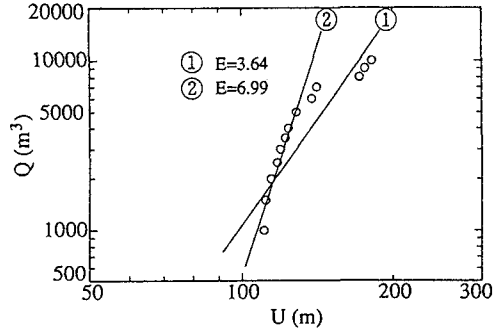


図-19 1段目の亀裂造成時の水の圧入流量の累積量 $Q$ と震源分布の平均距離 $U$ の関係

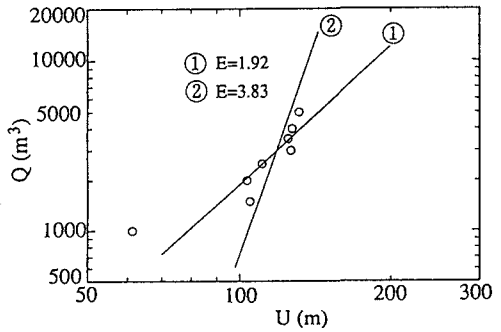


図-20 2段目の亀裂造成時の水の圧入流量の累積量 $Q$ と震源分布の平均距離 $U$ の関係

た水に作用して、遠くまで伝播し、広い範囲で亀裂が造成された結果と推測される。この観点にたてば、大きな $E$ の値が得られたのは既存割れ目の影響といえる。一方図-20では、圧入初期の値に対応する左端の1点を除外して回帰直線を求めると $E=3.83$ となるが、この点を含んで全点で回帰直線を求めると $E=1.92$ となる。したがってこのことから見るかぎり、2段目の破碎を全体としてみれば、圧入した水が板状に岩石を破碎しながら広がる傾向があったといえる。

図-17と図-18で求めたフラクタル次元を1段目と2段目で比較すると、1段目は2.47と2段目の2.11より大きかった。このことから、1段目では既存割れ目の影響を受けて亀裂が3次的に造成されたのに対し、2段目では1段目に比べて平面的な亀裂が造成されたと推測された。一方すでに述べたように係数 $E$ についても、1段目で大きな値が得られたのは既存割れ目の影響と考えることができ、また2段目の値が全体として2に近いのは板状の亀裂の造成を示唆していると思われた。このように、フラクタ

ル次元と係数Eが同じ傾向を示したことは、これらの値が亀裂の進展に関する有用な指標となりうることを示していると思われる。

#### (4) フラクタル次元の経時変化からみた貯留層評価の試み

1 段目は 1991 年 8 月 26 日～9 月 6 日の 13 日間にわたって昼夜連続で総量 10160m<sup>3</sup>の水を圧入した。2 段目は 1992 年 6 月 28 日～7 月 11 日の 14 日間にわたって総量 5440m<sup>3</sup>の水を圧入した。そこで、AE 震源分布に対するフラクタル次元の経時変化から、この水の圧入による亀裂の進展挙動の推論を試みる。

図-21 は、1 段目の亀裂造成時の AE 震源分布をその発生時刻にしたがって経時的に 5 つの期間に分けて解析し、フラクタル次元の経時変化を示したものである。解析期間は、図-10 に示した圧力、流量、AE 発生率の経時変化の他に図上に出力した AE 震源の空間分布の特徴の変化を参考にして区分した。図の横軸は解析対象とした AE の発生期間を、縦軸はその期間に発生した AE 震源の空間分布に対するフラクタル次元を示す。解析対象とした AE 震源の総数は 1642 個で、そのうち A 期間が最大で 807 個、D 期間が最小で 129 個である。これをみると、A、B の期間は時間とともにフラクタル次元が増大し、C、D、E の期間に入るとフラクタル次元が逐次的に減少する傾向が認められる。とくに B の期間は、他に比べてかなり大きい値を示すことがわかる。これは、実験開始から A、B の 9 日間は AE の震源分布が 2 次元的な板状の分布から 3 次元的な球状の分布に変化していく傾向が見られたことを意味する。とくに、B の期間に最大のフラクタル次元を示すことから、この期間には、1 段目の破碎位置に多数存在する既存割れ目に圧入水が侵入し、既存割れ目のさまざまな走向・傾斜に沿って広がり、亀裂が 3 次元的に進展したのではないかと推測される。その後 C、D、E の 4 日間は、フラクタル次元が逐次的に減少する傾向から既存割れ目に沿って進展した亀裂が互いに連結し、卓越節理の方向に支配されて平面的な亀裂に成長していったのではないと思われる。なお、最大、最小のフラクタル次元はそれぞれ B 期間、E 期間の 2.64、2.08 であり、図-9 の曲線を参照してこれらのフラクタル次元に対応する正四角柱の底面の長さに対する高さの比  $k$  を、求めると、それぞれ  $k=1.16$  及び  $k=23.5$  となる。

図-22 は、図-11 に圧力、流量、AE 発生率を示した 2 段目の亀裂造成時のフラクタル次元の経時変化である。解析対象とした AE 震源の総数は 1057 個で、そのうち A 期間が最大で 234 個、D 期間が最小

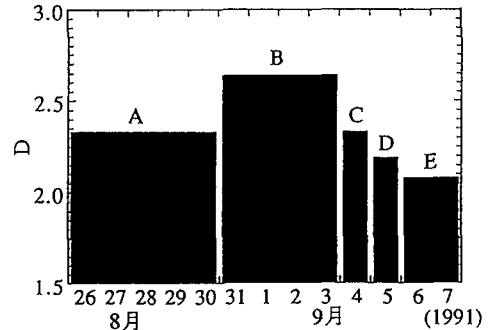


図-21 1 段目の亀裂造成に伴う AE 震源分布のフラクタル次元の経時変化

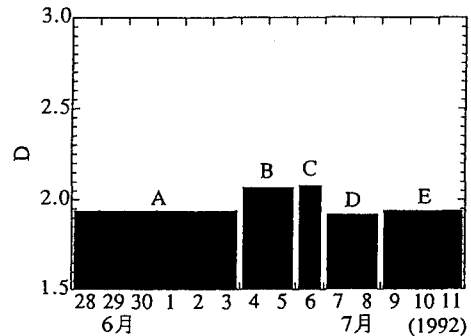


図-22 2 段目の亀裂造成に伴う AE 震源分布のフラクタル次元の経時変化

で 188 個である。これをみると、A、B、C の期間は時間とともにフラクタル次元がやや増大し、その後 D、E の期間に入ると減少する傾向がみられる。これは 1 段目の経時変化と傾向が似ているが、5 つの期間のフラクタル次元の大きさはいずれもは 1 段目のそれよりも小さく、その変化量も 1 段目ほど大きくない。したがって 2 段目の亀裂造成時には、1 段目と同様、AE の震源分布が 2 次元的な板状の分布からやや 3 次元的な球状に近づく傾向を示した後、ふたたび 2 次元的な板状分布に戻る変化を示したものの、その変化の程度は 1 段目のときほど大きくないといえる。なお、2 段目のフラクタル次元の最大値と最小値はそれぞれ C 期間と D 期間の 2.08、1.92 であり、上述の  $k$  の値を図-9 の曲線で求めると、それぞれ  $k=23.5$  と  $k=96.9$  となる。

上述のフラクタル次元の経時変化から推測される水圧破碎亀裂の進展過程は、既存亀裂の調査結果や地圧測定結果によって必ずしも強く支持されるとはいえないものの、少なくとも矛盾はせず、どちらか

という調和的であるように思われる。このことは、フラクタル次元の経時変化の検討が、新たな側面から破碎の進展に関する情報を提供する可能性を示していると思われる。

## 6. まとめ

(1) 線分上、平面上及び立方体内部に等間隔に点を分布させたモデルを考え、相関関数法によりこれらの点の分布に対するフラクタル次元を求めた。その結果、得られたフラクタル次元はそれぞれの分布形状のユークリッド次元に対応する1, 2, 3の値をやや下回る値を示すことがわかった。モデル内に点が無数あり分布範囲を点が完全に充填していれば、フラクタル次元はそれぞれの分布形状のユークリッド次元に一致するはずである。したがって、得られたフラクタル次元がユークリッド次元をやや下回るのは、モデルの点の数が有限個であり、それぞれの分布範囲を点が完全に充填していないためと思われる。

(2) 上述の結果は、AE震源分布に対して求めたフラクタル次元から地熱貯留層の性状を推定する場合、AE震源の分布密度を考慮する必要を示唆している。しかし、実際に解析の対象とするAEの震源はたとえ既存の割れ目に沿って発生している場合でも、その割れ目に沿った平面上もしくは線分上で、等間隔ではなくランダムに分布している。そこで乱数を用いたランダムな点の分布に対して、同様な検討を行った。その結果、線分上、平面上及び立方体内部にランダムに点を分布させたモデルのフラクタル次元はそれぞれのユークリッド次元をやや下回るが、点の数がある程度多くなれば、点の分布密度がフラクタル次元に与える影響はあまり小さくなく無視できる程度であることがわかった。

(3) 上述のランダムな点の分布の解析結果から、点の数が少ない場合には平均的には同じ分布密度でも乱数の組によって得られるフラクタル次元に大きなばらつきが生じるが、点の数が多くなるとこのばらつきも小さくなることがわかった。このことと(2)の結果とあわせて、地熱貯留層の性状の推定を目的としてAE震源分布のフラクタル次元を求める場合、解析対象とするAEの震源数は、少なくとも100点以上、できれば1000点以上であることが望ましいことがわかった。

(4) AE震源分布のフラクタル次元から貯留層の形状を評価するためには、点の形状とフラクタル次元との関係を、ある程度定量的に確かめておくことが望ましい。そこで正四角柱の内部に点をランダムに

分布させたモデルを考え、正四角柱の底辺の長さ $l$ と高さ $h$ の比を変化させて、フラクタル次元の変化を調べた。その結果、点の分布する範囲が扁平になれば、フラクタル次元が小さくなる傾向は顕著であることがわかった。また、フラクタル次元の大きさから点の分布形状を推定する目安として、解析結果を2次曲線で近似した参照曲線を示した。

(5) (財)電力中央研究所が秋田県雄勝地点において行った2回の亀裂造成実験のAEの震源分布に対しフラクタル次元を求めた。その結果、1段目の亀裂造成に伴うAE震源分布のフラクタル次元は2.47、2段目のそれは2.11であり、フラクタル次元からみれば1段目の方が2段目に比べて3次元的な亀裂が造成されたことがわかった。地質調査や坑口圧力、戻り水の分析の結果などから、1段目の亀裂造成は2段目より既存割れ目の影響を強く受けていることがわかっており、1段目と2段目のフラクタル次元の大きさの違いはこのような他の調査・分析結果とも合理的に対応することがわかった。

(6) 累積注入流量 $Q$ と震源分布距離 $U$ を両対数グラフ上にプロットし、これを直線近似したときの直線の傾き $E$ は、フラクタル次元に類似した概念と思われる。そこで、この $E$ の値を1段目と2段目で比較したところ、フラクタル次元と同様、1段目では大きな値を示し、既存割れ目の影響を受けて広い範囲で亀裂が造成されたことを示唆したのに対し、2段目では $E$ が2に近い値を示し、1段目に比べて平面的な亀裂が造成されたとの傾向を示した。このように、フラクタル次元とこの係数 $E$ が類似した傾向を示したことは、これらの値が亀裂の進展に関する有用な指標となりうることを示していると思われる。

(7) 2回の亀裂造成に伴うAEの震源分布に対しフラクタル次元の経時変化を求めた。1段目と2段目のいずれの亀裂造成でも、それぞれ13~14日間にわたり昼夜連続で水が圧入されたが、実験開始から9日間は時間とともにフラクタル次元が増大し、その後の4~5日間はフラクタル次元が減少する傾向が認められた。このことから破碎の進展の推測を試みれば、実験開始から9日間は圧入した水が破碎位置からさまざまな走向・傾斜を有する既存亀裂に沿って広がり、亀裂が3次元的に進展したのに対し、そのうちの4~5日間には、既存亀裂に沿って進展した亀裂が互いに連結し、それぞれの破碎深度の卓越節理の方向に支配されて平面的な亀裂に成長していたのではないかと推測された。

(8) このようにAEの震源分布のフラクタル次元を求めることにより、造成された地熱貯留層の性状を新たな観点から評価することができることがわか

った。今後、震源分布のフラクタル次元と AE のメカニズム解との比較や、造成された亀裂のフラクタルを用いた評価などを行い、さらに研究を進展させたいと考えている。

謝辞：本研究では、現場データへの適用例として、(財)電力中央研究所高温岩体発電研究プロジェクト(課題推進担当：北野晃一上席研究員)の成果を利用させていただいた。また、名古屋大学工学部教授(元(財)電力中央研究所参事、山口大学客員教授)沢田義博氏には、本研究を進めるにあたり貴重なご助言をいただいた。さらに山口大学工学部の佐野修教授と大西康智助手にもさまざまなご助言・ご指導をいただいた。なお、本研究の成果は、当時山口大学工学部 4 年生であった尾崎堅二君(現在、(有)尾崎土木)と松尾俊明君(現在、(株)ウエスコ)の努力によるところが大きい。ここに記して、深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) Smith, M. C., Nunz, G. and Ponder, G. M.: Hot dry rock geothermal energy development program (Annual Report Fiscal Year 1982), LANL Report, LA-9780-HDR, 1983.
- 2) 海江田秀志, 堀義直: 高温岩体発電の実用化に向けて, OHM, 1994 年 7 月号, pp.48-54, 1994.
- 3) 海江田秀志, 山本武志, 木方建造, 本島勲: 電中研雄勝 HDR プロジェクト—人工貯留層の造成とその評価—, 資源・素材' 96 (秋季大会, 仙台), 企画発表(A) 資料 (地殻工学・エネルギー), pp.118-121, 1996.
- 4) Xie, H.: Fractals in Rock Mechanics, Balkema, 1993.
- 5) Brown, S. R. and Scholz, C. H.: Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces, Journal of Geophysical Research, Vol.90, B14, pp.12575-12582, 1985.
- 6) 大西有三, 堀田政國, 大谷司郎: 画像システムを用いた岩盤割れ目のフラクタル幾何学的特性評価について, 土木学会論文集, 第 412 号/III-12, pp.61-68, 1989.
- 7) Den Outer, A., Kaashoek, J. F. and Hack, H. R. G. K.: Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surfaces, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.32, No.1, pp.3-9, 1995.
- 8) 村田澄彦, 斎藤敏明: フラクタルモデルによる岩盤不連続面の表面粗さ評価法について, 資源と素材, Vol. 113, pp.555-560, 1997.
- 9) Committee on Fracture Characterization and Fluid Flow, U. S. National Committee for Rock Mechanics: Rock Fractures and Fluid Flow, National Academy Press, Washington, D.C., 1996.
- 10) La Pointe, P. R.: A method of characterize fracture density and connectivity through fractal geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.6, pp.421-429, 1988.
- 11) Chang, J. and Yortsos, Y. C.: Pressure transient analysis of fractal reservoirs, SPE (Society of Petroleum Engineers) Formation Evaluation, pp. 31-38, March 1990.
- 12) 中塚勝人(研究代表者)ほか: クリーン地殻エネルギー抽出法の設計基礎理論—フラクタル破壊力学の構築とその応用—, 平成 5 年度~平成 7 年度科学技術研究費補助金(重点領域研究(1)研究成果報告書), 1997 年 3 月.
- 13) Kagan, Y. Y. and Knopoff, L.: Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function, Geophys. J. R. astr.Soc., Vol.62, pp.303-320, 1980.
- 14) Sadovskiy, M. A., Golubeva, T. V., Pisarenko, V. F. and Shnirman, M. G.: Characteristic dimensions of rock and hierarchical properties of seismicity, Izvestiya, Earth Physics, Vol.20, No.2, pp.87-96, 1984.
- 15) Hirata, T., Satoh, T. and Ito, K.: Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, Geophys. J. R. astr. Soc., Vol. 90, pp.369-374, 1987.
- 16) Grassberger, P.: Generalized dimensions of strange attractors, Physics Letters, Vol. 97A, No. 6, pp.227-230, 1983.
- 17) 海江田秀志, 作永貞雄, 本島勲, 木方建造, 堀義直: 雄勝高温岩体発電実験における多段亀裂の造成, 地熱, Vol.30, No.3, pp.109-116, 1993.
- 18) 近藤浩文: 高温岩体発電のための水圧破砕面の予測手法の開発—既存割れ目の性状評価について—, 電力中央研究所報告, 研究報告 U93039, 1994.
- 19) Kiho, K. and Mambo, V. S.: Reservoir characterization by geochemical method at the Ogachi HDR site, Japan, Proc. of World Geothermal Congress, Florence, Italy, pp. 2707-2711, 1995.

(1997. 3. 25 受付)

# FRactal ANALYSIS ON A SOURCE DISTRIBUTION OF ACOUSTIC EMISSIONS IN A HOT DRY ROCK MASS RESERVOIR

Tsuyoshi ISHIDA, Qu CHEN, Hideshi KAIEDA and Yoshiaki MIZUTA

To characterize a reservoir created by hydraulic fracturing, an application of fractal dimension analysis to source distribution of AE(acoustic emission) is examined. Applicability and reliability of the fractal dimension are studied by using distributions of points modeling AE sources. Based on the results, fractal dimensions are obtained for AE source distribution induced by hydraulic fracturing in a 1000 m deep well. Comparisons between fractal dimensions obtained and geological surveys elucidate that the fractal dimensions is promising to characterize the reservoir from the source distribution of AE.