

自己組織臨界現象と断層破砕帯のフラクタル

備フジタ 正会員 宇田川 義夫

1. はじめに

筆者は、断層運動の進展に伴う割れ目系のフラクタル次元変化について報告[1]し、そのフラクタル次元値によって断層運動の発達過程を定量的に評価できる可能性を示唆した。本論では、この断層運動に伴う割れ目系のフラクタル構造形成のメカニズムをBakら[2]によって提唱された「自己組織臨界現象」の観点から考察し、断層破砕帯のフラクタル次元の上限値を提示する。

2. 断層運動に伴う割れ目系のフラクタル構造形成

断層運動の進展に伴う岩盤割れ目系のフラクタル次元変化は、割れ目（リーデル・シア）の形成に伴い、フラクタル次元は $D=1.136$ から $D=1.408$ （a～c段階）まで次第に増大していく。その後、割れ目が相互に連結し、断層の萌芽の形成の段階（d、e段階）に至るとフラクタル次元は $D=1.418$ 、 $D=1.452$ となりフラクタル次元が $D=1.4\sim 1.5$ に収束するようになる（詳細は文献[1]を参照）。

Tchalenko[3]は、イランのDasht-e Bayaz 地震断層の地割れパターンも例にあげて、このようなa段階からe段階へと進む割れ目系の発達過程は、粘土盤のせん断実験から地震断層に至るまで、小さいものから大きいものまで、あらゆるスケールのせん断破壊にみられる構造であると論じている。

3. 自己組織臨界現象と断層破砕帯のフラクタル構造

断層運動に伴う応力伝達ならびに破壊現象が岩盤割れ目系のフラクタル構造を生じさせるメカニズムは、Bakら[3]によって提唱された「自己組織臨界現象(self-organized criticality)」の概念によって説明できるものと考えられる。この自己組織臨界現象の概念は地震学の分野に應用されており、地震の頻度と大きさの統計量（Gutenberg Richter則）を良く説明するものとなっている。

自己組織臨界現象の概念では、自然界のシステムは限界安定状態にあり、その状態が乱されても、自然界のシステムは限界安定状態に落ち着くように変化していく。このような限界安定状態（臨界条件）のもとでは、固有のスケールというものは存在せず、そのため、統計的フラクタルが適用できる。自己組織臨界現象を表現する簡易なモデルとしては、セルオートマトン・モデル(cellular-automata model)があげられる。

また、Dyer[4]による自由面モデル(free surface model)によれば、断層破砕帯近傍では断層変位による影響により局所的な応力場の乱れが生じる。すなわち、断層方向に垂直方向の応力成分が断層変位による応力解放の影響で解消されてしまうから、局所的な応力場の主応力軸は、 σ_1 は断層と同一方向、 σ_2 ならびに σ_3 はゼロに漸近し、見かけ上の一軸応力状態となる。田中・斉藤[5]による中央構造線の測地測量による研究、中国での地震予知に関連した研究（田中[6]、国家地震局地震地質大隊四隊ほか[7]）は、このような断層周辺での主応力軸の方向性の乱れを支持する結論となっている。

以上のことから、断層破砕帯周辺岩盤における見かけ上の一軸応力状態は、高安[8]によって提示された1次元セルオートマトン・モデルによって近似することができるものと考えられる。

すなわち、1または-1の値をとる変数 $S_i(t)$ （ i は1次元格子の座標、 t は離散的な時間を表す）の時間発展関数が、

$$S_i(t+1) = S_{i-1}(t) \times S_i(t) \quad (1)$$

によって与えられると仮定するものである。

また、Griffithの破壊理論[9]によると、岩石破壊の進展は内部の潜在微小クラックにおける応力集中によって生じる。この観点からみると、上記の1次元セルオートマトン・モデルは、1軸応力状態において、潜在微小クラック（グリフィスインクルージョン）の存在による局所的な岩石強度の差異（大小）によって微小破壊が生じ、時間の経過とともに破壊が伸展していく過程をシュミレートしたものと考えられる。

ここで、初期条件をランダムに数点“1”（グリフィスインクルージョン）とし、他を全て“1”としたときの時間発展は図1のようになる。この時空パターンのフラクタル次元は $D=1.588$ （図2）となり、基本的にシルピンスキーのギヤスケットと同一となる。このように、局所的な相互作用だけでスケールに依存しないゆらぎを伴う構造（フラクタル構造）が作られる。

Hirata[10]は、Griffithのつりあい式から、岩盤割れ目の表面積とそれを作るエネルギーとの競合により2次元（面的）分布のフラクタル次元の上限が1.6程度であることを示したが、この次元の値は1次元セルオートマトン・モデルで作られるフラクタル構造の次元値 $D=1.588$ とほぼ同じ値となっている。

4. まとめ

断層運動に伴う応力伝達ならびに破壊現象すなわち、岩盤の局所的な応力集中、破壊、周辺への応力再配分といった過程は、1次元セルオートマトン・モデルによって近似することができ、自己組織臨界現象においてフラクタル構造が形成されるものといえる。また、断層近傍の割れ目系のフラクタル次元は $D=1.588$ (1.6)程度に収束するものと考えられる。

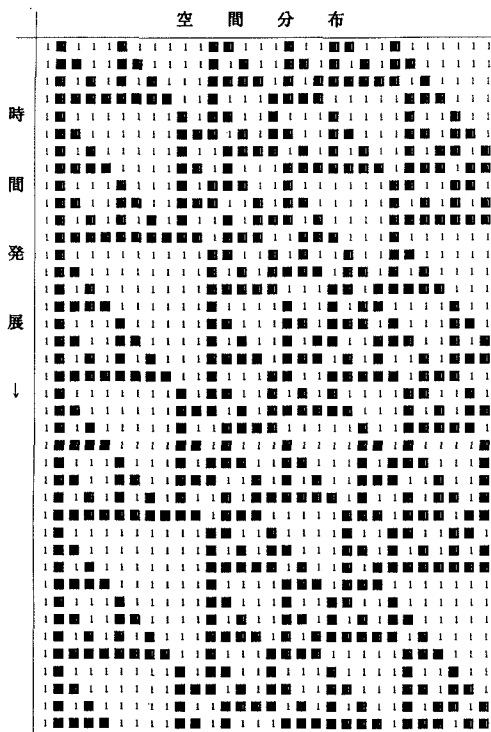


図1 1次元セルオートマトン・モデルによる時間発展

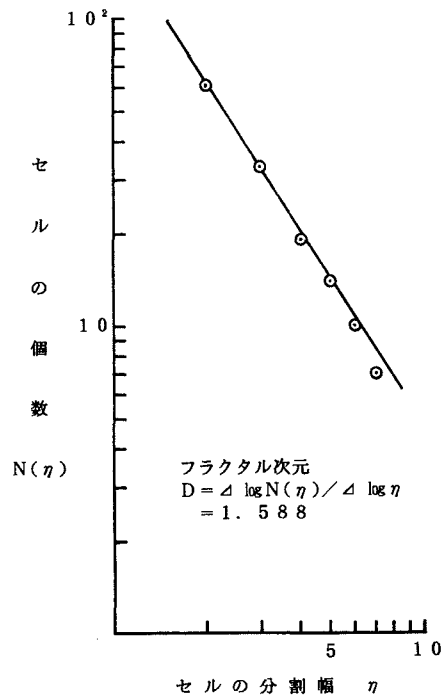


図2 時空パターンのフラクタル次元

【参考文献】

- [1]宇田川義夫：断層破砕帯のフラクタル構造モデル、第29回土質工学研究発表会講演集、土質工学会、pp.1235～1236、1994。
- [2]Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K.: Self-organized criticality, Phys. Rev. A38, pp.384～374, 1988.
- [3]Tchalenko, J.S.: Similarities between shear zone of different magnitudes, Geological Society of America Bulletin, v.81, pp.1625～1640, 1970.
- [4]Dyer, R.: Using joint interactions to estimate paleostress ratios, J. Struct. Geol., Vol.10, pp.685～699, 1988.
- [5]田中 登、斎藤敬明：応力解放法による地殻応力の測定、地球、Vol.2、No.9、pp.630～647、1980。
- [6]田中 登：1977年地震学会訪中代表団報告集、pp.89～111、1978。
- [7]中華人民共和國・国家地震局地震地質大隊四隊・地質科学院地質力学研究所地力組：地質力学文集、3、pp.115～129、1979。
- [8]高安秀樹：フラクタルとその応用、日本ファジ学会誌、Vol.4、No.5、pp.798～805、1992。
- [9]Griffith: Theory of rupture, Proc. 1st Cong. for Applied Mech. Delft, 1924, Berlin, 1925.
- [10]Hirata: Fractal Dimension of Fault Systems in Japan: Fractal Structure in Rock Fracture Geometry at Various Scales, PAGEOPH, Vol.131, Nos.1/2, pp.157～170, 1989.