



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	断層破碎帯の破碎の進行のシミュレーション(fulltext)
Author(s)	越智,翔士; 藤本,光一郎
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 66: 75-79
Issue Date	2014-09-30
URL	http://hdl.handle.net/2309/136937
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

断層破碎帯の破碎の進行のシミュレーション

越 智 翔 士*・藤 本 光一郎**

環境科学分野

(2014年5月23日受理)

OCHI, S. and FUJIMOTO, K.: Simulation of progress of fracturing of fault zone. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **66**: 75-79. (2014) ISSN 1880-4330

Abstract

It is well known that fractal dimension is higher in fault zones than in the original rocks. In general, fractal has no scale dependence and repeating fracturing does not necessarily results in increase in fractal dimension. In this study, we try to find favorable conditions for increasing fractal dimension like natural faults by simple two dimensional model calculations.

Keywords: fractal dimension, particle size distribution, fracturing simulation

Department of Environmental Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

要旨: 破碎帯において母岩よりフラクタル次元は高くなるが、断層活動の繰り返しによりフラクタル次元がどのように変化するのかわかっていない。本研究では破碎の時系列変化を明らかにするために、野島断層で得られた破碎のパラメータが実現されるような破碎の条件を単純な二次元モデルの計算によって求めた。

* 町田市立忠生中学校 (194-0035 東京都町田市忠生 3-14-1)
** 東京学芸大学 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

1. はじめに

本研究では、断層破砕帯の破砕の程度をフラクタル次元を用いて評価することを目的としている。しかし、ある値のフラクタル次元がどのような破砕の状況を示すのかは直観的にわかりづらい。また、断層破砕帯は複数回の地震活動を経て成長していると考えられているが（たとえば、Vermilye and Scholz, 1998）、その過程におけるフラクタル次元の変化はほとんど研究されていない。たとえばChester et al. (2005) は破砕帯の粒度分布から破砕エネルギーを見積もっているが、破砕帯の幅の成長という観点で考察している。フラクタル次元にはスケール依存性がなく、必ずしも断層活動の繰り返してフラクタル次元が増加する必要はない。しかし、筆者による野島断層の解析（越智・藤本, 2014）では、主要なすべり面である中軸のガウジのフラクタル次元が、周囲の副断層より小さいことがわかっており、断層活動の活発さとフラクタル次元に関連性が示唆されている。本研究では、越智・藤本(2014)によって明らかになった破砕のパラメータを用い、コンピュータ上で破砕を再現することによって、破砕の時系列変化の一端を明らかにすることを目的とする。

2. 研究方法

2. 1 思考実験

「フラクタル次元が1.00の状態」、即ち粒径が2分の1になるごとに粒子数が2倍になる仮定の粒子の集合を想定し、粒子が等しく破砕される場合と小さな粒子が生み出される場合のフラクタル次元の変化を考察した。

2. 2 繰り返し

2. 1で得られた結果を拘束条件として、破砕帯が複数回動いた場合をシミュレートした。

2. 3 Bondの法則

2. 1, 2. 2で得られた結果をBondの法則に代入することで、破砕の結果つくられる断層ガウジの厚さを推定した。なお、本シミュレーションでは、破砕前粒径と破砕後粒径が想定及び計算によって求められること、花崗岩の仕事指数が既知であり、野島断層の岩相（花崗閃緑岩）と近いことから、Bondの法則を選択した。Bondの法則は次式で表わされる。詳細は粉体工学会（2005）を参照されたい。

$$E = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)$$

ただし、 E : 破砕エネルギー [kWh/t], W_i : 仕事指数 [kWh/t] (花崗岩の仕事指数は15.13), P : 破砕後粒径 [μm], F : 破砕前粒径 [μm] である。

2. 4 破砕ダイヤグラム

破砕の過程をダイヤグラム化し、その全過程をシミュレートすることで、生成される破片の平均粒径比を求めた。その平均粒径比がBondの法則に適合するもの、かつ、2. 1, 2. 2, 2. 3のシミュレートの結果が野島断層のフラクタル次元の実測最大値(2.26)になりうる粒径比、破壊回数、粒子数において、Bondの法則により地震回数の推定を行った。

3. 結果

3. 1 思考実験

思考実験の初期条件を図1に、結果を図示したものを図2～図4に示す。

図2のように、1つの粒子が4等分された場合のフラクタル次元は1.00のままであった。一方、図3のように、1つの粒子から小さな破片が生み出される場合、例えば粒径比0.1の破片が10個のとき、フラクタル次元は1.15になった。

粒径比を0.01～0.10、破片数を10個～1000個まで変化させた様子を図4に示す。

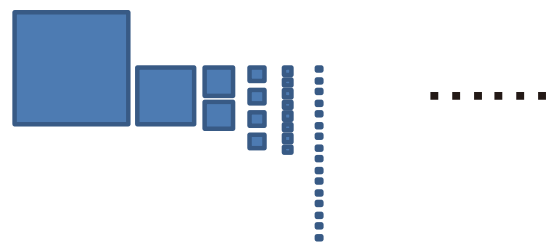


図1 初期条件（フラクタル次元が1.00の状態）



図2 1つの粒子を4等分した場合のモデル



図3 1つの粒子から小さな破片が生み出されるモデル

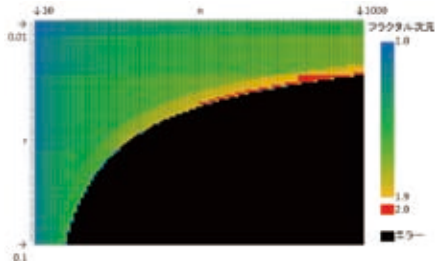


図4 $0.01 \leq r$ (粒径比, 縦軸) ≤ 0.1 , $10 \leq n$ (個数, 横軸) ≤ 1000 で変化させた場合のシミュレーション結果

3.2 繰り返し

破片数 1, 5, 10, 粒径比 0.01, 0.05, 0.10 を組み合わせた 5 通りについて, 破壊を 1 ~ 8 回繰り返した場合のフラクタル次元の変化を図 5 に示す。図 5 によれば, フラクタル次元は破片数 10, 粒径比 0.1, 破壊

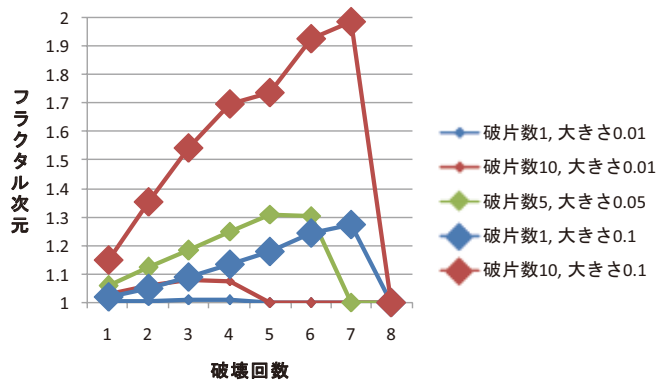


図5 破壊回数とフラクタル次元の関係

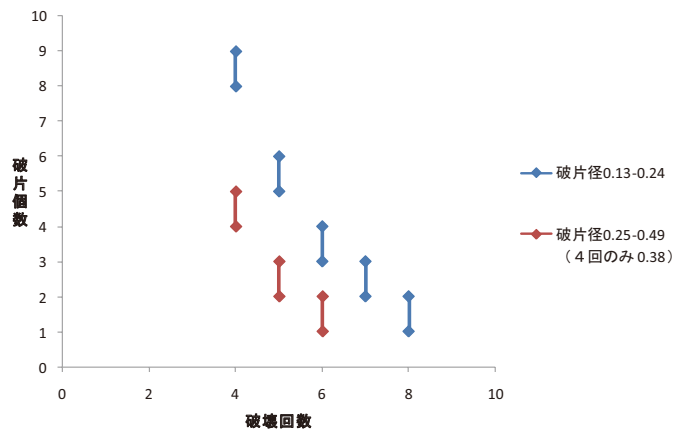


図6 破壊回数と破片個数の関係

回数7回の際に特に大きくなる。また, 破片数12, 粒径比0.25, 破壊回数9回の際に最大値6.8となる。

さらに, 実際に測定されたフラクタル次元である 1.3 を初期条件とした場合, 図 6 に示すように, 粒径比が 0.13 ~ 0.24 の場合には破壊回数 4 ~ 8 回, 破片数 1 ~ 9 個で, また, 粒径比が 0.25 ~ 0.49 の場合には破壊回数 4 ~ 6 回, 破片数 1 ~ 5 個でフラクタル次元 2.26 となった。

3.3 Bondの法則

3.1, 3.2 を基に, 破碎前の粒径を 10 ~ 500 μm , 粒径比が 0.13 ~ 0.24 および 0.25 ~ 0.49 になる層厚を Bond の法則によって求めた結果を図 7, 図 8 に表わす。これらの図によれば, 破碎前の粒径が 90.9 ~ 262.9 μm または 14.9 ~ 84.4 μm であれば野島断層の断層ガウジと同じ厚さの断層ガウジができる。なお, 条件はフラクタル次元 2.26 を満たすためのものであり, 条件を外れると破碎後の粒子はフラクタル次元 2.26 とならない。

3.4 破碎ダイアグラム

破碎ダイアグラムに基づく粒径比と地震回数の関係

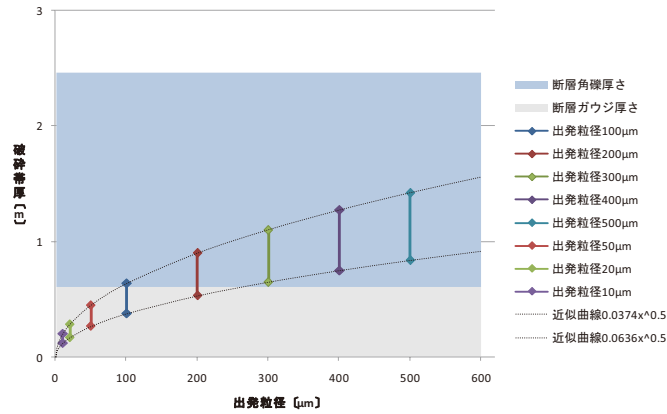


図7 出発粒径と破碎帯厚の関係 (粒径比0.13 ~ 0.24の場合)

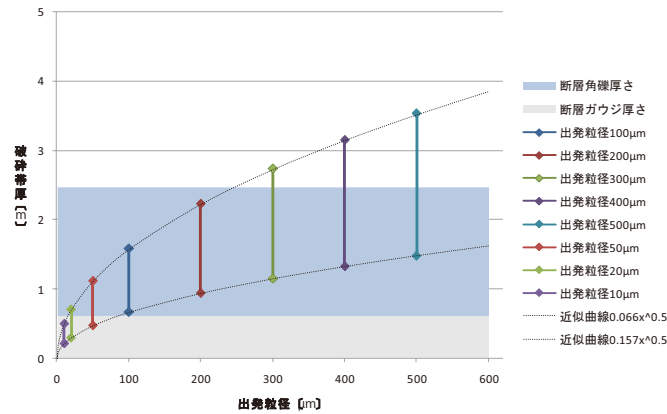


図8 出発粒径と破碎帯厚の関係 (粒径比0.25 ~ 0.49の場合)

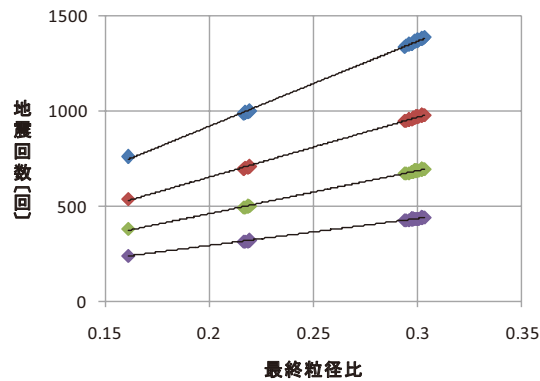


図9 最終粒径比と地震回数の関係

を図9に示す。図9によると、地震回数は約250回から約1400回程度であると見積もられる。

4. 考察

4. 1 破片の大きさ、個数とフラクタル次元の関係
結果3. 1および3. 2から、破片の粒径比が大きくなると、個数が多い方がフラクタル次元が高くなるのがわかる。これは、フラクタル次元の基本的な性質に基づく感覚と一致する。なお、破片が大きい方が個数増

加に対して鋭敏に反応するが、破片の総面積が元の粒子の面積を超えることはないため、そのフラクタル次元の最大値には限界があり、破片が大きい方が限界に達しやすい。

4. 2 Bondの法則による絞り込みおよび破碎ダイヤグラムによる成因の推測

結果3. 3よれば、野島断層の断層ガウジは粒径比0.13 ~ 0.24の破片が1 ~ 9個生まれる破壊が4 ~ 8回起こることによってできた可能性が高い。なお、粒

径比0.24～0.49の場合も同様にフラクタル次元2.26となり得るが、最初の粒径が90.9～262.9 μm または14.9～84.4 μm と小さいため、異なると考えられる。さらに、これらの情報を基に破碎ダイヤグラムを作成し、シミュレーションを実行すると、野島断層は250～1400回動いたとするとフラクタル次元に関して観測結果とシミュレーションが一致する。なお、中軸帯の実際の出発粒径は1141 μm であり、地震回数はMurata et al. (2001)による垂直変位量の見積もり(490～540 m)と1回あたりのすべり量(1m)を考えると、500回程度となる。本実測値を使用すると、最終粒径比は0.14となり、実際にFE-SEMによって計測した 7.5×10^{-4} とは大きく異なる。これは、実際の破碎では、破片が生み出される過程がモデルよりも複雑であり、より細かな破片が多数生み出されているためであると考えられる。

5. 結論

シミュレーションはあくまでも理想的な条件下での破碎を再現したものであるため、実際の破碎帯と比較することは難しいが、以下の点について事実を反映するものであると言える。

- ① 元の破片から等分されるのではなく小さな破片が生まれる破碎をするとき、フラクタル次元は

増加する。

- ② 破片の面積が大きく、個数が多い方がフラクタル次元が高くなる。
- ③ 破碎の回数が増えるほどフラクタル次元が高くなる。

なお、これらの間には相関関係が見出され、それに基づく野島断層は250～1400回程度活動したと推測される。

引用文献

- Chester, J., Chester, F. and Kronenberg, A.: Fracture surface energy of the Punchbowl fault, San Andreas system, *Nature*, 437, p.133~136 (2005)
- 粉体工学会：粉体の生成，粉体工学叢書2，日刊工業新聞社，p.183, (2005)
- Murata, A., Takemura, K., Miyata, T. and Lin, A.: Quaternary vertical offset and average slip rate of the Nojima Fault on Awaji Island, Japan, *Island Arc*, 10, pp.360~367 (2001)
- 越智翔士・藤本光一郎：フラクタル次元を用いた断層破碎帯の破碎の程度の定量的評価，東京学芸大学紀要自然科学系，第66集，pp.61~74 (2014)
- Vermilye, J. M. and Scholz, C. H. : The process zone: A microstructural view of fault growth, *Journal of Geophysical Research*, 103, B6, pp. 12223-12237 (1998)