

断層内物質とフラクタル (粒度分布特性と表面積)

Intrafault Materials and Fractals — Grain-Size Distribution and Grain Surface Area —

長濱裕幸*

Hiroyuki Nagahama

Abstract: A fractal analysis of intrafault materials has been made for the purpose to elucidate the properties of intrafault materials and to appreciate faults. It is shown to give a power-law mass relation of intrafault materials $M(r)/M_T = (r/\sigma)^h$, where $M(r)$ is the cumulative mass of fault fragments with a radius less than r , M_T is the total mass, and σ is the mean size. Moreover the distribution of various fault parameter sizes takes a power law distribution as $N(r_f) \sim r_f^{-P}$ where r_f and $N(r_f)$ denote the fault parameter size and the cumulative number of fractures larger than r_f respectively, and P is constant. These results indicate that the size distribution of intrafault material and fault parameter can be described by fractal distributions. And h -value and P -value represent the degree of fracturing and the structural uniformity of intrafault materials or fractured regions. The relationship between the mean grain size (\bar{r}) of intrafault materials and the specific surface area (S) of them is given by $S \sim \bar{r}^{D'-3}$, where D' is the surface fractal dimension of intrafault materials. From the analysis of various types of faults, D' may be related to both the degree of fracturing and the rate of weathering in the fault zone. Therefore, it is disclosed that the h -value, P -value and D' -value are the important parameters to appreciate faults.

はじめに

基盤中に存在する断層は、その規模の大小にかかわらず常に断層内物質を伴う。その断層内物質の生成過程を示す基本特性として粒度分布

や粒子表面積などがある。大規模断層の断層内物質は広域的にあるいは断層内の組織の部分において、粒度分布や表面積に相違がある。これらは断層破砕帯内の剪断運動による力学的な破壊や風化による細粒化現象が、それぞれの特徴

*東京大学地震研究所

Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Tokyo 113, Japan.

(現所属：静岡大学理学部地球科学教室)

Present address: Institute of Geoscience, School of Science, Shizuoka University, Shizuoka 422, Japan.

を示すものとして説明される。また、逆に断層内物質の粒度分布は断層運動そのものに大きく影響を及ぼすものと考えられている。

応用地質の分野において割れ目や断層の解析調査は重要な調査の一つである。たとえば、資源探査では資源の分布を規制する断層の分布やその変位を知ることが重要であり、また土木地質では破砕帯の岩盤の強度や透水性などに大きく影響を与える岩盤割れ目の分布や断層内物質の地質工学的評価が必要とされている。さらに、断層の活動性を評価するため、断層内物質を手がかりとする研究が試みられるようになってきている（金折ほか，1980；緒方・本荘，1981；金折ほか，1982；田中，1989）。しかし、断層は大小様々な大きさを持ち、不規則に存在しているため、これらの分野にとって断層内物質をどう捉えるかが大きな問題となってきている。一方、最近ではフラクタルの概念を複雑なパターンへの解析に導入することによって、ある程度複雑なパターンの規則性を見いだすことが可能になってきている（Mandelbrot, 1977, 1982）。そこでこの論文では、断層内物質の破砕度をどのように定量的に表現したらよいかをフラクタルの立場から考察する。

破壊産物とフラクタル分布

一般に破壊産物の粒度分布（粒径分布と同じものであるが、これまでは粒度分布という用語が多く使われていたようである。）はべき乗則

$$N(r) \sim r^{-D} \quad (1)$$

D ：破壊産物の粒度分布に関する定数

$N(r)$ ：粒径 r より大きい破壊産物の累積個数

によって表される（Hartmann, 1969；竹内・水谷，1968；水谷，1989；Poulton et al., 1990）。このことは破壊現象が粒度分布に関して尺度不変な現象であることを示唆している（Matsushita, 1985；Turcotte, 1986, 1989；Cheng & Redner, 1988；Nagahama, 1991）。

尺度不変とはある有限でランダムな集合において、小さなスケールの集合の成分の分布が大きなスケールの集合の成分の分布と一致することである。したがって、破壊現象にはスケールにかかわらず共通する統計的法則（相似則）が存在していることになる。このような粒度分布をフラクタル分布と呼んでいる（Mandelbrot, 1977, 1982；Turcotte, 1986, 1989）。また、 D 値は小さい粒径に対する大きい粒径の相対的な測度を表し、フラクタル次元と呼ばれている。式(1)から数学的に破壊産物の重量パーセントを表す式

$$M(r)/M_T = (r/\sigma)^h \quad (2)$$

$$h = 3 - D \quad (3)$$

$M(r)$ ：粒径 r 以下の累積重量

M_T ：破壊産物の全重量

σ ：破壊産物の平均サイズに関する値

h ：定数

が導かれる。これは粉碎工学の分野においてGaudin-Schuhmannの粒度分布式と呼ばれている。さらに、破壊強度論の観点から考察すると式(1)の D 値や式(2)の h 値は次式

$$D = 3 - h = 3 - k/w \quad (4)$$

k ：定数， w ：ワイブルの均一性係数，

によって表される（Nagahama, 1991）。ここでワイブルの均一性係数(w)は破壊される材料の均一性を表し、その値が小さくなるほど材料は不均一になる（Weibull, 1939a, b）。したがって、式(4)は D 値が材料の不均一性と関係することを示している。たとえば、物質の相対的分散強度が低いものほど、その D 値は高い値を示す。また、正味の破壊に要するエネルギー(ϵ)と粒径(r)との関係は次式

$$\epsilon \sim r^{D+3} \quad (5)$$

ϵ : 破壊エネルギー密度(破壊に要する単位重量あたりのエネルギー)

によって表される(Nagahama, 1991). もし破壊されるものの大きさが同じならば, 破壊エネルギー密度が高いほどD値は高いことを式(5)は示している. このことは凝灰岩の衝撃破壊実験(Matsui et al., 1982)においても経験的に知られていた(Fig. 1). さらに, 式(1)と式(5)は破壊される材料が不均一になるほど粒径(r)の減少による単位重量当りの破壊エネルギーの増加が顕著なることを表している. したがって, 上述のことから, D値や h 値は破壊の強さ(破砕度)や物質の構造的不均一性を知るうえで重要な指標となりうるということが明かである.

断層内物質とフラクタル分布

これまでに実在の断層について断層内物質の組織性状を取り扱った研究は多い. たとえば, Higgins (1971), Sibson (1977), 木村 (1973, 1980), 高木(1982)などは断層岩の分類定義を行っており, また山田(1978), 松田・岡田(1977), 武藤ほか(1981), 高木(1983), Yoshida(1985)らは破砕度という観点から定性的に断層内物質を分類している. また天然の断層内物質の粒度分析を行った研究例として, Engelder (1974), 金折ほか(1980), Olgaard & Brace (1990)などがあげられる. しかし, 前章

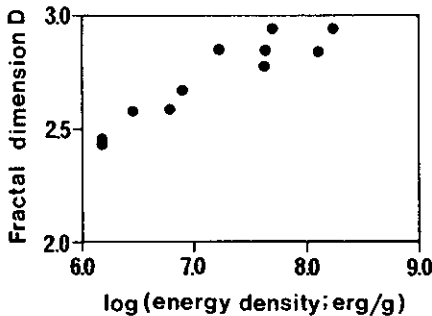


Fig. 1 Fractal dimension D of the size distribution of the fragments vs. the energy density ϵ (Data from Matsui et al., 1982).

で述べたようなフラクタルの観点から断層内物質を定量的に表現している研究例は Sammis et al.(1986), Zhao et al.(1990), Nagahama (1991) と, その数は少ない. そこでこの章では, 前章で述べた破壊産物の粒度分布特性を用いて断層内物質の粒度分析をおこない断層の特徴を定量的に表現することにする.

いくつかの断層における断層内物質の粒度分析結果(Fukushima, 1984MS)を用いると, 断層内物質の粒度分布は, 式(2)で表される Gaudin-Schuhmann の粒度分布を示している(Fig. 2). これらの結果は主断層面に近づくにつれて粒度が細粒化することを示し, Engelder (1974)が行った Muddy Mountain thrust fault の分析結果と類似している. 解析結果(Fig. 2)の直線の傾きから, 式(2)の h 値を求めることができる. 前章で述べたことから, この h 値は断層内物質の構造的不均一度や破砕度を表していると考えられる. 天然の断層内物質の解析結果は主断層面に近づくにつれて h 値が低くなる傾向を示している(Fig. 2). このことは, 破砕度が高まるにつれて h 値が低くなることを意味している. このように, 断層内物質の h 値から, 断層の破砕度を定量的に見積ることができる.

一方大規模な破壊に関しても微小な破壊と同様な相似法則が成り立つとすれば, 岩盤や地殻の破壊に関しても同様にフラクタル分布が期待される. 各サイズの幾何学的形状に関する各断層パラメータ(断層の長さ, 幅, 変位量)のサイズ分布(垣見・小玉, 1974; 小玉, 1976; 緒方, 1976; Kakimi, 1980; 緒方・本荘, 1981; 山口・長谷, 1983; Segall & Pollard, 1983; 大野・小島, 1988)において, 式(1)と同型の分布式

$$N(r_i) \sim r_i^{-P} \quad (6)$$

r_i : 各断層パラメータのサイズ

$N(r_i)$: サイズ r_i 以上の累積個数

P : 各断層パラメータに関するサイズ分布のフラクタル次元

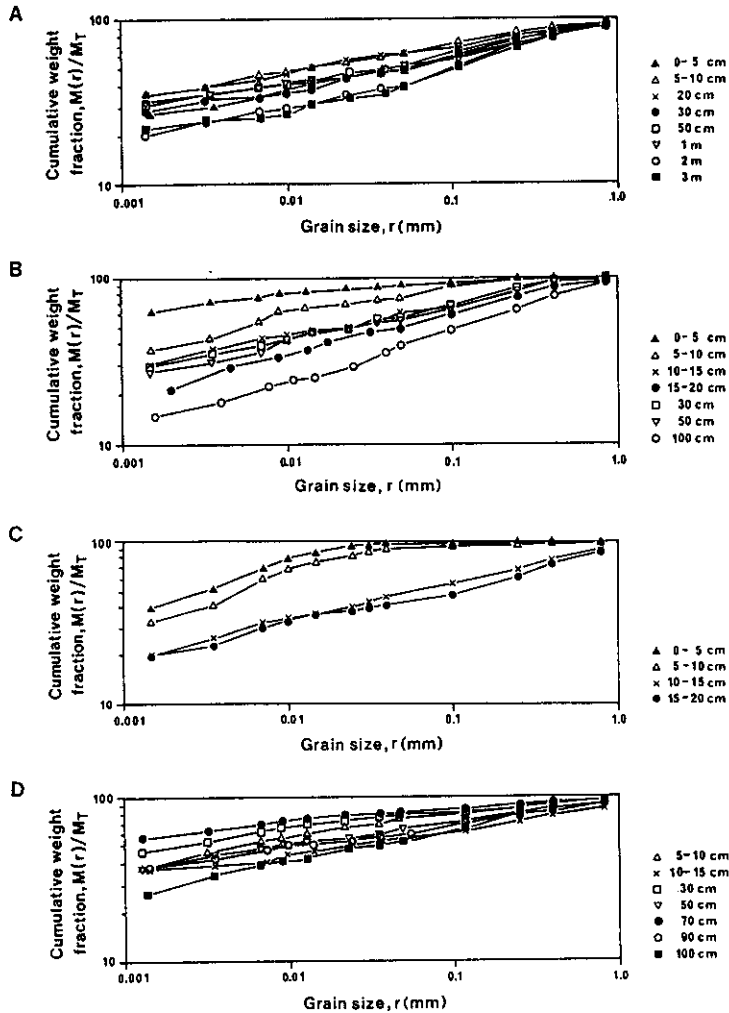


Fig. 2 Size distribution of fault fragments. Symbol marks show the distances from the fault plane (Data from Fukushima, 1984MS). A: Sodezawa Fault, B: Kizugawa Fault, C: Hananoki Fault, D: Atotsugawa Fault.

が認められる (Table 1). このことは岩盤や地殻の破壊に関してもフラクタル分布が成り立つことを意味している。またこの P 値も岩盤や地殻的な地殻の破碎度や構造的不均一度と関係している (垣見・小玉, 1974; 渡辺, 1979; Kakimi, 1980; Nagahama, 1991). このように、各断層パラメータに関するサイズ分布の P 値から、岩盤や地殻的な地質体の破碎度を定量的に見積ることができる。

破壊産物の表面形状

破壊面の形状もフラクタルの典型的な例である (Mandelbrot et al., 1984; Nii et al., 1985; Brown & Scholz, 1985). 実際破壊実験の結果では破壊産物の比表面積 (S) と破壊産物の平均粒径 (\bar{r}) との間により相関が認められている (Nii et al., 1985). 比表面積 (S) と破壊産物の平均粒径 (\bar{r}) との関係は式

Table 1 Power-law relation of fault parameter size. Asterisk indicates the Japanese reference.

r_f	P	Source	Detail
Fault length	0.52	Kodama (1976)	Normal fault (Experiments)
	1.30	Yamaguchi & Hase (1983)*	Lineament
	1.70, 1.95	Ohno & Kojima (1988)*	Lineament
Fault width	0.39-0.94	Ogata (1976)	Fracture thickness
	0.39-0.94	Ogata & Honsho (1981)*	Fracture thickness
	0.60, 1.40	Ohno & Kojima (1988)*	Fracture thickness
Joint length	0.30, 0.80	Segall & Pollard (1983)	Joint
Crack width	0.78-1.50	Watanabe (1979)**	Micro-crack
Displacement	0.30-1.40	Kakimi & Kodama (1974)*	Normal-slip fault
	0.30-1.40	Kakimi (1980)	Normal-slip fault

* In Japanese with English abstract.

** In Japanese.

$$S \sim \bar{r}^{D'-3} \quad (7)$$

によって表される (Avnir et al., 1983 ; Mandelbrot et al., 1984 ; Cahn, 1989). このとき D' 値は破壊面の表面形状に関するフラクタル次元 (Surface fractal dimension) を表し, D' 値が大きいほど破壊産物の形状は不規則で, D' 値が小さいほど破壊産物の形状は球形に近い (Avnir et al., 1983). Nagahama (1991) は Nii et al. (1985) の破壊実験の結果を用いて, D' 値が破壊エネルギー密度の増加にともなって増加することを明かにした (Fig. 3). このことは Rittinger の粉碎理論 (Rittinger, 1867) の拡張形としても容易に理解できる. Fig. 3 の例からも明らかのように, D' 値は破壊の強さを知るうえで重要な指標となりうる.

断層内物質の表面形状

ここでは, 断層の活動エネルギーを考える上で重要なパラメータである断層内物質の表面形状について検討してみよう.

Henderson 鉱山や Haulage トンネル (Brekke & Howard, 1973) より採取された断層内物質の比表面積 (S) とその平均粒径 (\bar{r}) の間には, 式 (7) の関係が認められる (Fig. 4). 金折ほか

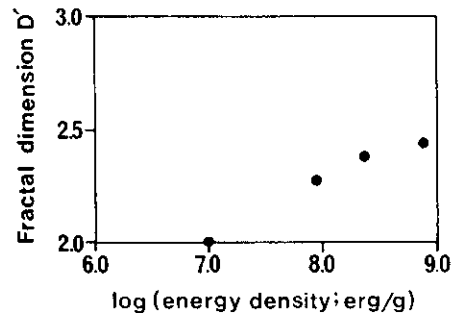


Fig. 3 Surface fractal dimensions D' as a function of the energy density (Data from Nii et al., 1985).

(1980)によって既に指摘されているように, 断層内物質の比表面積 (S) と平均粒径 (\bar{r}) とは密接な関係をもっている. Fig. 4 は平均粒径 (\bar{r}) が減少するにつれて比表面積 (S) が増大することを示している. また, Table 2 にはこれまでに報告された断層内物質の表面形状に関する解析結果 (Nossin & Levelt, 1967 ; Brekke & Howard, 1973 ; 金折ほか, 1980 ; 金折ほか, 1982) から求めた D' 値を示してある. Fig. 4 と同様の解析をもとに, 金折ほか (1980) は破壊の場合には局所的な細粒化が進む現象であるため平均値の減少の仕方が大きく, 表面積の増え方が小さいと考え, 断層内物質の比表面積 (S) と

Table 2 Surface fractal dimension D' of fault fragments. MTL: Median Tectonic Line.

Fracture	D' -value	Source
Atotsugawa F. (Amodani) (Makawa)	2.57	Kanaori <i>et al.</i> (1982)*
	2.50	Kanaori <i>et al.</i> (1982)*
	2.70	Kanaori <i>et al.</i> (1980)*
MTL (Yoshinogawa) (Kinogawa)	2.74	Kanaori <i>et al.</i> (1980)*
	2.62	Kanaori <i>et al.</i> (1980)*
Neodani F.	2.66	Kanaori <i>et al.</i> (1980)*
	2.72	Kanaori <i>et al.</i> (1980)*
Straight Creek tunnel	2.47	Brekke & Howard (1973)
Nast tunnel, Henderson Mine tunnel, and Haulage tunnel	2.47	Brekke & Howard (1973)
Weathered rocks	2.60	Nossin & Levelt (1967)
Same particle sizes	2.00	

*In Japanese with English abstract.

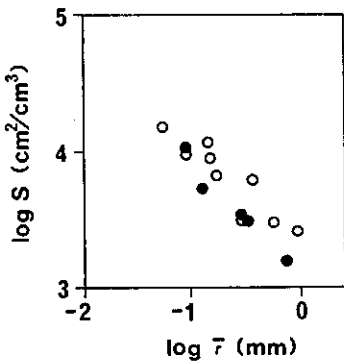


Fig. 4 The specific surface area S (cm^2/cm^3) as function of mean particle diameter \bar{r} (mm). ○; Straight Creek tunnel. ●; Henderson Mine tunnel and Haulage tunnel (Data from Brekke & Howard, 1973).

平均粒径 (\bar{r}) との関係から求めた傾き ($=D'-3$) は風化の進行速度に関係していると判断した。確かに力学的な破壊のみで行った実験結果 (Fig. 3) からは D' 値の上限がおよそ 2.5 に漸近しているのに対して、実在の断層内物質の D' 値は 2.47~2.74 とより大きな値を示している (Table 2)。また、風化岩の D' 値は 2.60 と 2.5 よりも大きな値をとることから、風化に起因して D' 値は増加しているようである。しか

し、化学的にせよ力学的にせよひとたび破壊がおこれば、比表面積 (S) と平均粒径 (\bar{r}) との関係には式 (7) が認められることから、 D' 値を風化の進行速度のみに関係づけるには問題がある。このことから、断層による破壊と風化による破壊に対する D' 値の影響については今後より慎重に検討していくことが必要であろう。

むすび

小論はフラクタルという数学的概念を用いて断層内物質の粒度分布や粒子の表面構造を調べ、断層内物質の定量的表現を行い、以下のような結果を得た。

1) 断層内物質の粒度分布は式

$$M(r)/M_T = (r/\sigma)^h$$

によって表現される。この h 値は断層内物質の破碎度を示すパラメータである。

2) 各サイズの幾何学的形状に関する各断層パラメータ (断層の長さ, 幅, 変位量) のサイズ分布は式

$$N(r_f) \sim r_f^{-p}$$

によって表現される。この P 値は岩盤や地域的な地質体の破碎度の指標となりうる。

3) 断層内物質の比表面積(S)とその平均粒径(\bar{r})との関係は、式

$$S \sim \bar{r}^{D'-3}$$

によって表現される。この D' 値は断層運動による破壊や風化に起因して増加する傾向にある。しかし、ここでは断層による破壊と風化による破壊に対する D' 値の影響については今後より慎重な検討を要することを指摘するにとどめた。

このように小論では、断層内物質のフラクタル特性を表す h 値と、 P 値や D' 値が、断層の破碎度や風化の程度を解く上で重要な鍵となることを論じた。

ここでは特に論じはしなかったがここ数年の間にフラクタルの観点から岩石中の割れ目の形態的特徴と浸透率との関係や割れ目のサイズ分布と電気伝導度との関係についての研究が進められている(Brown, 1987; Katz & Thompson, 1987)。応用地質の分野においても、今回行った解析結果と岩石の物性値(浸透率や電気伝導度)との関わりあいについて今後検討していくことが必要であろう。そのためにも、形の持つ情報を有効に利用し、フラクタルなど形を取り扱う分野での法則を使って、断層内物質と岩石物性との関係をよりリアルに捉えていくことが重要である。

謝辞

この論文を作成するにあたり、大阪市立大学理学部地学教室中川康一助教授、同教室小山彰博士、(財)機械電子検査検定協会の福島真英氏らには、断層粘土に関する未公表データ(大阪市立大学理学部地学教室修士論文)を提供していただいた。記して謝意を表します。

文献

- Avnir, D., Farin, D. and Pfeifer, P., 1983: Chemistry in noninteger dimensions between two and three. II. Fractal surfaces of adsorbents. *Jour. Chem. Phys.*, v.79, 3566-3571.
- Brown, S.R., 1987: Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness. *Jour. Geophys. Res.*, v.92, 1337-1347.
- Brown, S.R. and Scholz, C.H., 1985: Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *Jour. Geophys. Res.*, v.90, 12575-12582.
- Brekke, T.L. and Howard, T.R., 1973: Functional classification of gouge material from seams and faults in relation to stability problems in underground openings. Final report USBR. 195p. Dept. Civil. Engrs., Univ. Calif, Berkley, Calif.
- Cahn, R.W., 1989: Fractal dimension and fracture. *Nature*, v.338, 201-202.
- Cheng, Z. and Redner, S., 1988: Scaling theory of fragmentation. *Phys. Rev. Lett.*, v.60, 2450-2453.
- Engelder, J.T., 1974: Cataclasis and the generation of fault gouge. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v.85, 1515-1522.
- Fukushima, M., 1984MS: Basic study on physical property of fault gouge. Osaka City Univ., Dept. Geosci. M. Sc. Thesis. 80p.
- Hartmann, W.K., 1969: Terrestrial, lunar, and interplanetary rock fragmentation. *Icarus*, v.10, 361-381.
- Higgins, M.W., 1971: Cataclastic rocks. *U.S. Geol. Surv., Prof. Paper*, 687, 97p.
- Kakimi, T., 1980: Magnitude-frequency relation for displacement of minor faults and its significance in crustal deformation. *Geol. Surv. Japan, Bull.*, v.31, 467-487.
- 垣見俊弘・小玉喜三郎, 1974: 断層の落差別頻度分布と、地殻ひずみおよび地震活動

- との関係性について. 地質調査所月報, v.25, 75-87.
- 金折裕司・吉岡直人・宮腰勝義・角田隆彦, 1980: 断層内物質の粒度分布特性と表面積. 電力中央研究所・研究報告 379029. 33p.
- 金折裕司・猪原芳樹・宮腰勝義・佐竹義典, 1982: 跡津川断層に伴う断層内物質(その1). 応用地質, v.23, 137-155.
- Katz, A.J. and Thompson, A.H., 1987: Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. *Jour. Geophys. Res.*, v.92, 599-607.
- 木村敏雄, 1973: 岩石の変形と地質構造—特に階層構造について—. 科学, v.43, 738-744.
- 木村敏雄, 1980: 断層, とくに断層破砕帯の見方, 考え方. 応用地質, v.22, 4-16.
- 小玉喜三郎, 1976: 背斜ヒンジ部に発達する正断層の形成機構. 新潟大学理学部地質鉱物学教室・研究報告(西田彰一教授退官記念論文集), no.4, 415-421.
- Mandelbrot, B.B., 1977: *Fractals: form, chance and dimension*. 365p. W.H. Freeman and Company, San Francisco, Calif.
- Mandelbrot, B.B., 1982: *The fractal geometry of nature*. 468p. W.H. Freeman and Company, New York.
- Mandelbrot, B.B., Passoja, D.E. and Paullay, A.J., 1984: Fractal character of fracture surfaces of materials. *Nature*, v.308, 721-722.
- 松田時彦・岡田篤正, 1977: 断層破砕帯の破砕度階級—野外観察による分類試案—, MTL, no.2, 117-125.
- Matsui, T., Waza, T., Kani, K. and Suzuki, S., 1982: Laboratory simulation of Planetesimal collision. *Jour. Geophys. Res.*, v.87, 10968-10982.
- Matsushita, M., 1985: Fractal viewpoint of fracture and accretion. *Jour. Phys. Soc. Japan*, v.54, 857-860.
- 水谷 仁, 1989: 岩石の破壊による粒子のサイズ分布. 地学雑誌, v.98, 696-702.
- 武藤 章・豊蔵 勇・松浦一樹・池戸政行, 1981: 活断層の調査例—柳ヶ瀬断層. 応用地質, v.22, 32-51.
- Nagahama, H., 1991: *Fracturing in the Solid Earth. Sci. Rep., Tohoku Univ., 2nd ser. (Geol.)*, v.61, 103-126.
- Nii, Y., Nakamura, K., Ito, K., Fujii, N. and Matsuda, J., 1985: The fractal dimension of fracture fragments in relation with fracturing energy. *Proc. 18th ISAS Lunar and Planetary Symp.*, 58-59.
- Nossin, J.J. and Levelt, W.K., 1967: Igneous rock weathering on Singapore Island. *Zeit. J. Geomorph.*, v.11, 14-35.
- Olgaard, D.L. and Brace, W.F., 1990: The microstructure of gouge from a mining-induced seismic shear zone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* v.20, 11-19.
- 緒方正虔, 1976: 基盤地域における断層の活動性評価—破砕幅および破砕物質の性質. 応用地質, v.17, 198-211.
- 緒方正虔・本荘静光, 1981: 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価. 応用地質, v.22, 67-87.
- 大野博之・小島圭二, 1988: 岩盤中の割れ目系にみられるフラクタル. 応用地質, v.29, 295-302.
- Poulton, M.M., Mojtabai, N. and Farmer, I.W., 1990: Scale invariant behavior of massive and fragmented rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* v.27, 219-221.
- Ritinger, P.R.v., 1867: *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. 19p. Ernst und Korn, Berlin.
- Sammis, C.G., Osborne, R.H., Anderson, J.L., Banerdt, M. and White, P., 1986: Self-similar cataclasis in the formation of fault gouge. *Pageoph.*, v.124, 53-78.

- Segall, P. and Pollard, D.D., 1983: Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada. *Geol. Soc. Amer., Bull.*, v.94, 563-575.
- Sibson, 1977: Fault rocks and fault mechanisms. *Jour. Geol. Soc. Lond.*, v.133, 191-213.
- 高木秀雄, 1982: マイロナイトの定義及び圧碎岩類の分類に関する問題点. 早稲田大学教育学部学術研究(生物学・地学), no.31, 49-57.
- 高木秀雄, 1983: 中央構造線沿いの圧碎岩類に認められるカタクラスティックな重複変形. —長野県上伊那地域の例—. 早稲田大学教育学部学術研究(生物学・地学), no.32, 47-60.
- 竹内 均・水谷 仁, 1968: 地震発生と脆性破壊の関係. *科学*, v.38, 622-624.
- 田中和広, 1989: 断層内物質による断層の活動性評価. 日本応用地質学会平成元年度シンポジウム予稿集. 15-26.
- Turcotte, D.L., 1986: Fractals and fragmentation. *Jour. Geophys. Res.*, v.91, 1921-1926.
- Turcotte, D.L., 1989: Fractals in geology and geophysics. *Pageoph*, v.131, 171-196.
- Yoshida, S., 1985: Model of fracturing along the Tsurukawa Fault, west of Tokyo. *Jour. Fac. Sci., Univ. of Tokyo*, v.21, 223-237.
- 渡辺邦夫, 1979: 花崗岩中に発達する micro-crack 系の性状とその定量的評価の二, 三の試み. *応用地質*, v.20, 12-22.
- Weibull, W., 1939a: A statistical theory of the strength of materials. *Ing. Vetenskap Akad., Stockholm Handligar.*, no.151, 45p.
- Weibull, W., 1939b: The phenomenon of rupture in solids. *Ing. Vetenskap Akad., Stockholm Handligar.*, no.153.
- 山口 靖・長谷紘和, 1983: 多様な画像によるリニアメント頻度の解析—レーダ画像の屋久島地域への適用例について—. *写真測量とリモートセンシング*, v.22, 4-13.
- 山田直利, 1978: 阿寺断層を追って(その1) 恵那山トンネルから付知まで. *地質ニュース*, no.283, 37-49.
- Zhao, Z.Y., Wang, Y. and Liu, X.H., 1990: Fractal analysis applied to cataclastic rocks. *Tectonophysics*, v.178, 373-377.