

地震と破壊実験とフラクタル

筑波大学 物理工学系 平田隆幸

1はじめに

破壊現象とフラクタルとのかかわりは、ラテン語の形容詞 *fractus* (対応する動詞 *frangere* “こわれる”) にちなんで *fractal* という言葉が Mandelbrot (1983) によって作り出されたように非常に関係が深い。大規模な岩石 (地殻) の破壊現象である地震は、Mandelbrot が最初に想像していた以上に破壊現象とフラクタルが関係深いことを教えてくれる。地震によって作られた断層は、個々の断層表面 (破壊表面) の幾何学形状が自己相似であること以外に、断層のサイズ分布も自己相似であり、断層系として見た場合の branching パターンも自己相似である。さらに、地震の発生を点過程 (point process) として見た場合、発生時刻、発生位置、発生規模の分布が自己相似構造をしている。

これらの地震の自己相似構造の事実が、なぜ現われるのかはまだ分かっていない。self organized criticality による地震のモデルは、ある意味で地震のサイズ分布の自己相似構造をうまく説明できるように見える。しかし、地震がもっている自己相似構造のほんの一部を説明することに成功した段階であるともいえる。

ここでは、地震だけではなくより広く岩石の破壊現象とフラクタルについて述べる。岩石の破壊は、その物質としての不均質性 (クラック、ジョイント、断層などの弱い部分を含んでいる) がフラクタル構造と密接に関連していると考えられる。(例えば、ガラスの破壊面はフラクタルではない。)

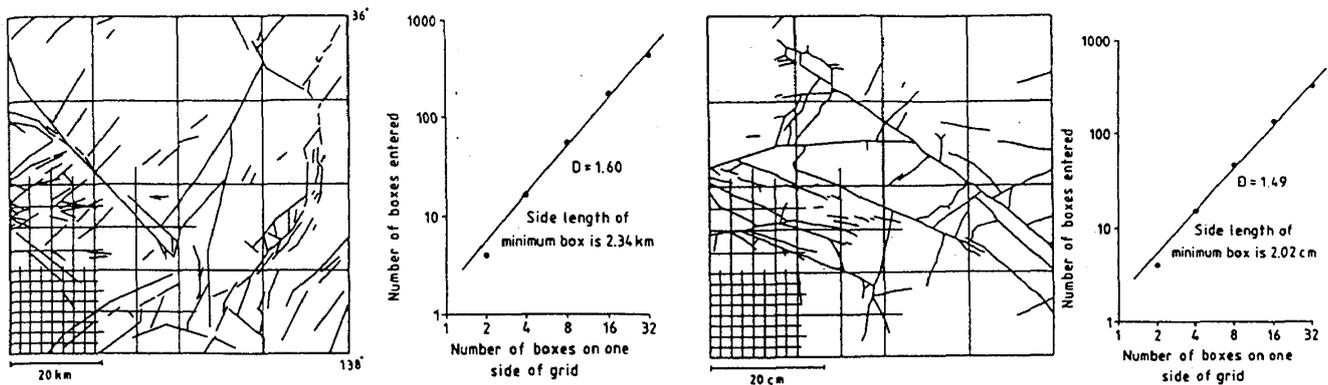


Fig. 1 断層系と岩石のひび割れ (after Hirata 1989a)

破壊パターン (岩石のひび割れ、断層系)

岩石のひび割れパターン (数cm~数十cmオーダーの破壊パターン) と断層系 (数km~数十kmオーダーの破壊パターン) のパターンの例を Fig. 1 に示す。box-counting algorithm によって求めたフラクタル次元は、両パターンとも約 1.6 であり、ほぼ等しい値を示す(Hirata, 1989a)。岩石をクラック、ジョイント、断層を含む不均質系として見た場合、不均質系での破壊パターン形成は、統計的には同じパターンを示すことがわかる。

点過程としてみた破壊のフラクタル構造

破壊過程を点過程 (point process) として見た場合、各破壊は、位置、時刻、規模の情報を持っている。地震の規模分布は、Gutenberg - Richter 式、 $\log N(M) = a - bM$ に従うことが知られている。ここで、 M はマグニチュード ($M \sim \log(\text{energy})$)、 $N(M)$ はマグニチュード M の地震の発生個数、 a 、 b 、は定数である (地震学では、パラメータ b は、 b -値と呼ばれている)。つまり、地震のサイズ分布はべき乗則に従う。この破壊サイズのべき乗法則は、岩石の微小破壊実験において観測される AE (acoustic emission) においても成立する (see, review Hirata, 1987a)。

地震の発生位置 (震源) の空間分布もフラクタル構造をもつことが、box-counting algorithm、correlation function を使った解析によって明らかにされている。岩石の破壊実験をおこなった場合に発生する AE の空間分布も、岩石試料全体の破壊が進むとフラクタル構造 ($D=2.75 \sim 2.25$) をもつようになる(Hirata et al., 1987)。

最近、地震の空間分布がマルチ・フラクタル構造をもつことが分かってきた。関東地域の微小地震の震源分布の一般化次元 D_q を求めた結果、 $D_2 = 2.2 > D_3 > \dots > D_\infty = 1.7$ (Fig. 2) となる(Hirata & Imoto 1991)。

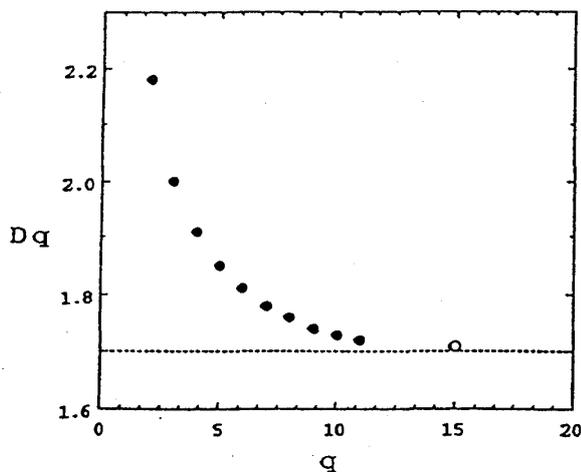


Fig. 2 D_q vs. q (after Hirata & Imoto 1991)

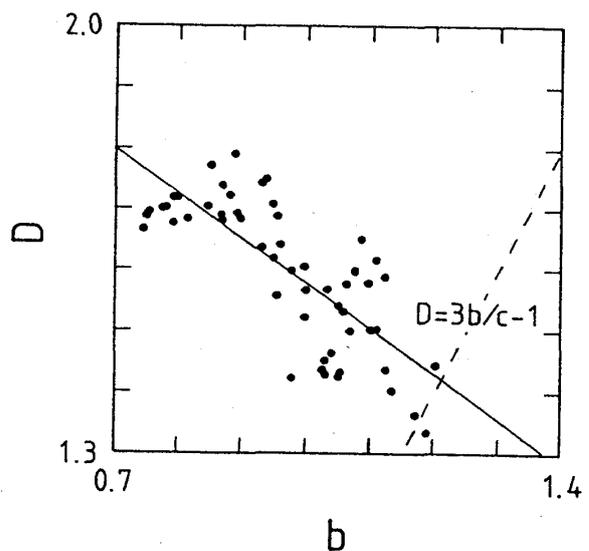


Fig. 3 D vs. b (after Hirata 1989b)

地震の発生時間間隔の分布、一個の地震によって励起される次の地震の発生レートもべき法則（大森公式）に従うことが分かってきている。大森公式による破壊のべき乗型の励起法則は、実験室での微小破壊の時系列においても見つかっている(Hirata, 1987b)。

以上のように、地震を含めた岩石の破壊は、破壊パターンにおけるフラクタル構造だけではなく、点過程として見た場合も、時間、空間、規模の分布においてフラクタル構造をもつことが分かってきている

各フラクタル次元間の相関

ここまで、岩石の破壊において、破壊パターン、点過程として見たときの時間、空間、規模の分布において自己相似構造をもつことを見てきた。そこで、各フラクタル次元の間の相関がどのようになってくるのだろうかという興味湧いてくる。まだ、各フラクタル次元の間の相関は良く分かっていない。現在は、東北地方、西日本地方に発生したマグニチュード5.5以上の地震の空間分布のフラクタル次元Dとサイズ分布のフラクタル次元であるG-R式のb値の間に、負の相関があることが報告されている(Hirata, 1989b) (Fig. 3)にとどまっております、これからの研究課題といえる。

まとめ

材料に一つのクラックを仮定して、クラックの先端での応力集中によるクラックの成長から破壊を取り扱う問題は、線形破壊力学によって発展してきたが、物質の中にクラックが多数存在している不均質物質での破壊現象は、今までの線形破壊力学では取り扱えない。不均質物質（地殻）の破壊現象は、まだまだ未知な部分が多く、これからの発展が期待される面白い分野である。また、地震現象の面白さは、その繰り返し破壊現象にあるとも言える。繰り返し破壊による地殻の応力場（歪場）の自己組織化現象としてのフラクタル、断層系の形成などは、均質物質の破壊とは一味違った問題である。

最後に、研究会を組織して下さった世話人の方々に感謝いたします。

References

- Hirata, T. (1987a), A new perspective for earthquakes and fractals, *Zisin* 2, 40, 459-467, (in Japanese)
Hirata, T. (1987b), Omori's power law aftershock sequence of microfracturing in rock fracture experiment, *J. Geophys. Res.*, 92, 6215-6221.
Hirata, T., T. Satoh, & K. Ito (1987), Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 90, 369-374.
Hirata, T. (1989a), Fractal dimension of fault systems in Japan: Fractal structure in rock fracture geometry at various scales, *PAGEOPH*, 131, 157-170.
Hirata, T. (1989b), A correlation between the b value and the fractal dimension of earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 94, 7507-7514.
Hirata, T. & M. Imoto (1991), Multi fractal analysis of spatial distribution of microearthquakes in the Kanto region (1991), *Geophys. J. International* (in press).