

19. 岩石破壊のダイナミクス：微小破壊から巨大地震まで

京都大学 理学部 平田隆幸

ものはなぜ壊れるのだろうか？エントロピー増大を考えると、ものは壊れる方向にむかうことは当然のように思える。では、ものはただ漫然と壊れていつているのだろうか？それとも、最終的にはエントロピー最大の状態に至るとしても、その途中の過程においては、ある秩序のようなものが現れるのではないだろうか？

このような視点にたって岩石の破壊現象をながめて見ると、非常におもしろいものが見つかってくる。とくに、地震の発生を考えてみると、地震は地殻のあるリージョンが破壊して発生するのであるが、その破壊したリージョンは時間の経過とともに healing（元に戻る）をおこし、破壊が発生する前の状態にもどる。よって、ある一定時間で見ると、地震の発生は、あるパターンを形成していると考えられる（散逸構造といえる）。

また、マクロな破壊は、ミクロな破壊が集積した結果発生すると考えると、臨界現象とみなせる。実際、巨大地震や実験室での破壊実験においてもサンプル全体の破壊はある臨界点（臨界応力）をもっている（微小地震あるいはサンプル内での微小破壊が発生する応力は、ある分布、例えばワイブル分布、に従っているとみなせるが、マクロな破壊はある応力で発生する）。そして、破壊においても他の臨界現象にみられるようなスケーリングが存在している。ここでは、破壊時に存在するスケーリング、または、破壊のパターン、ひび割れのパターンについて述べることにする。

地震のサイズ分布は、古くから Gutenberg-Richter の統計式

$$\log N(M) = a - bM$$

に従うことが知られている。ここで、 M は地震の規模を示すマグニチュード、 $N(M)$ はマグニチュード M のイベントの個数、 a 、 b は定数である。マグニチュードがエネルギーの対数値であることを考慮すれば、破壊のサイズ分布はベキ乗則に従うことがわかる。

この破壊のサイズ分布がベキ乗則に従うことは、地震だけではなく、実験室において計測される微小破壊のサイズ分布においても、成立していることがMogi¹⁾

によって明らかにされている。また、非常に高速度な変形破壊実験と考えられる、衝突破壊実験においても、Fragments (破片) のサイズ分布がベキ乗法則に従うことが Fujiwara et al. (1978)²⁾ によって明らかにされるにおよび、破壊時は、他の臨界現象と同じくスケーリングという考えによって整理し、理解できるのではないかと期待が持たれるようになってきた。

最近のトピックは、地震の発生を点過程(point process)と考えた場合、震源の空間分布が自己相似構造(フラクタル)をしていることが分かってきたことである。全ての震源からみた、半径 r 以内の地震の個数を $N(r)$ とすると、

$$N(r) \sim r^D$$

になっていることが Kagan and Knopoff³⁾ によって明らかにされた。ここで D はフラクタル次元である。また、この破壊の空間分布構造は、実験室での岩石破壊実験における微小破壊の空間分布においても成立していることが、Hirata et al.⁴⁾ によって明らかにされた。個々の破壊の間の相互作用によって、破壊の空間分布にフラクタル構造が表れると考えられる。このことは、重力などの相互作用によって、宇宙の構造がフラクタル構造をしていることと対応させて考えてみるのは興味深いことである。

時間軸からみた地震はどのように発生するのだろうか？ 一個の地震の発生が次のイベントの発生にどのような影響を与えるのであろうか？ Kagan and Knopoff⁵⁾、Ogata⁶⁾ は、地震カタログを統計解析することによって、全ての地震の発生は次のイベント発生にベキ乗則 t^{-1} でエキサイトすることを明らかにしている。ベキ乗則で、次のイベントに影響を与えることが、破壊実験時の微小破壊においても存在することを Hirata⁷⁾ は明らかにしており、岩石の破壊時の相互作用の特徴であると考えられる。つまり、岩石の破壊は、ベキ乗則に従うような、長時間メモリーを持つことが分かってきたといえる。この破壊(地震発生)のメモリー効果は、Ogata⁶⁾ によると30年以上にも及ぶものであることが明らかにされている。

ひび割れのかたちについて考えてみよう。金属の破壊表面がフラクタルであることが Mandelbrot et al.⁸⁾ によって報告されている。同じことが岩石の破壊についても言える。岩石の破壊表面のトポグラフィがフラクタルであることを Brown and Scholz⁹⁾ は明らかにした。Okubo and Aki¹⁰⁾、Aviles and Scholz¹¹⁾ は、San Andreas fault の断層系がフラクタルであることを示した。Hirata¹²⁾ は、

断層系から露頭のひび割れまでのフラクタル次元を求め、ひび割れのフラクタル次元には上限値が存在し、約1.6であることを示唆した。

現在までに、岩石の破壊をスケーリングと言う観点から眺め直すと、時間、空間、規模においてフラクタル構造をしていることが分かってきている。スケーリングということを考えると、実験室における微小破壊から巨大地震までの岩石の破壊現象を統一的に理解できる可能性がでてきたといえるのではないだろうか？

破壊現象は、物理学者があまり興味を持ってこなかった分野ではなかろうか？しかし、臨界現象として破壊を眺め直したり、散逸構造として、地震の発生パターンを考えることにより、今まで見えていなかった地平が見えてくることが期待される。破壊現象には、物理学者がやるべきことが多く残されているように思えるのだがどうであろうか。

Reference

- 1) K. Mogi, Bull. Earthq. Res. Ins. Tokyo Univ., 40 (1962) 831.
- 2) A. Fujiwara, G. Kamimoto, and A. Tukamoto, Nature 272 (1978) 602
- 3) Y. Kagan and L. Knopoff, Geophys. J. R. astr. Soc. 62 (1980) 303
- 4) T. Hirata, T. Satoh, and K. Ito, Geophys. J. R. astr. Soc. 90 (1987) 369
- 5) Y. Kagan and L. Knopoff, Geophys. J. R. astr. Soc., 55 (1978) 67
- 6) Y. Ogata, J. Amer. Stat. Assoc., 83 (1988) in press
- 7) T. Hirata, J. Geophys. Res., 92 (1987) 6215.
- 8) B. Mandelbrot, D. E. Passoja, and A. J. Paullay, Nature 308 (1984) 721
- 9) S. R. Brown, and C. H. Scholz, J. Geophys. Res., 90 (1985) 12575
- 10) P. Okubo, and K. Aki, J. Geophys. Res., 92 (1987) 345
- 11) C. J. Aviles, and C. H. Scholz, J. Geophys. Res., 92 (1987) 331
- 12) T. Hirata, Pure and Applied Geophys. (1988) in press