

砂山の臨界状態の解明から地震の予測法を探る研究

A trial for forecasting earthquakes from clarifying the critical state of a sandpile

客員研究員 吉岡直人

研究の概要（和文）：砂山崩しの実験における砂山の崩れ方と、地震の発生の仕方の類似性に着目し、大きなナダレが発生する直前の状態、すなわち臨界状態では砂山内部における応力鎖の状態がどのようなになっているかを調べる目的で、光弾性物質を用いた2次元の砂山崩し実験とその解析を行った。この結果、大きな砂山では、大きなナダレの直前に、表面付近で斜面にほぼ平行な応力鎖が発達し、これが臨界状態を形成すると思われる。小さな砂山では、これが明瞭には現れない。この差が、大きな砂山と小さな砂山の崩れ方の違いの原因ではないかと思われる。

研究の概要（英文）：Focusing on the similarities between avalanches in sandpile experiments and earthquake occurrence, we performed two-dimensional sandpile experiments using a photo-elastic material in order to clarify the internal structure of a sandpile prior to large avalanches, namely in a critical state. The results of the analysis show that in large sandpiles, stress chains almost parallel to the surface slope are created which seems to organize the critical state. In contrast, small sandpiles have no such a clear structure of stress chains. This fact may bring the differences in the behavior of the avalanches between the large and small sandpiles.

1. 研究の背景

(1)有名な Bak *et al.* (1987)の研究で、「自己組織化臨界現象 (SOC と略)」という概念が提唱され、地震の規模別頻度分布を表すグーテンベルグ・リヒター則は、この典型であるとされた。Bak たちが用いた「セルラー・オートマトン」というモデルが「砂山崩し」に例えられたことから、地震と SOC が結び付けられるようになった。このモデルによれば、地震の規模別頻度分布はべき乗則にしたがい、その発生は予測不可能となる。

(2)一方、Schwartz and Coppersmith (1984)は、断層のトレンチ調査を行い、「固有地震 (CE と略)」という概念を提唱した。これは、大きな地震は、ある程度決まった周期でほぼ同じ大きさのものが繰り返し発生するというもので、グーテンベルグ・リヒター則から予測される頻度よりはより多く発生する、というものである。

(3)Bak たちはコンピュータシミュレーションで「砂山崩し実験」を行ったのであるが、実際の砂を使って「砂山崩し実験」を行うと、不思議なことに、SOC と CE が両方とも実現されるのである。砂を受ける受け皿の大きさ

と、砂粒の粒径の比によってどちらが現れるか(卓越するか)、が決まる (Yoshioka, 2003)。

2. 研究の目的

以上のような「砂山の崩れ方」と「地震」という、一見何の関係もないような物理現象の類似性から、「砂山」を詳しく調べることによって、「地震」の発生の仕方、ひいては大きな地震の発生の予測へのヒントが得られるのではないかと、というのが本研究の根本的な動機である。

砂山などの破壊における「臨界現象」とは何であるか、そしてその予測はどのような物理量に着目すれば可能となるのか、という問題意識をもって、本研究を行った。

砂山はもちろん砂粒で構成されているのであるが、その内部構造は一様ではなく複雑であり、この構造によって、砂山の崩れ方が決定されている可能性があるのではないかと考え、光弾性物質を用いた2次元の砂山でこれを解明することとした。砂山内部の構造と、その変化を詳細に、しかも定量的に把握し、地震の予測へつなげてゆくことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 光弾性物質を用いた実験

すでに上で述べたように、本研究では光弾性物質を用いて、2次元の砂山を形成し、その内部構造を明らかにする。

図1に実験の様子を示す。すなわち2枚の透明な壁の間に、光弾性物質で作成した模擬砂（直径12mmおよび9mm、厚さ6.35mm）を1つ1つ数を数えながら落とし、砂山を形成する。砂山は次第に成長し、限界に達すると崩れるが、この過程で光弾性写真を撮り、変化を観察した。

模擬砂を受ける台の長さを変えることにより、砂山の大きさを変えて、砂山の大きさの違いによる、内部構造の違いを把握するよう努めた。

この写真に示されているように、多くの場合、壁間の一方をふさぎ、半分の砂山を形成した。これは左右対称になることを前提として、なるべく大きい砂山を形成するための措置である。

光弾性物質としては米国 Measurement Group Co. Ltd.が製造販売している PSM-4 を採用した。また、光弾性写真を撮るシステムとしては、米国 StressPhotonics 社製 GFP1200 を採用した。



図1 光弾性物質による2次元の砂山を作る実験の様子。

(2) データ解析法の開発

このようにして採取した光弾性写真のデータは、512×384ピクセルのデータであり、GFP1200システムはこれをEXCELのデータとして排出する機能を備えている。これを利用して、すべてのデータをマトリックスの数値データとして保存した。

さらに、この数値データから、2枚の写真の差を取ったり（すなわちその間の変化量を

把握する）、応力鎖の大きさや方向を自動的に解析し、ローズダイアグラムを描くプログラムなどを開発した。

4. 研究成果

(1) 砂山内部構造の可視化

3.(1)で述べた実験によって、2次元の砂山の内部構造を可視化し、観察することに成功した。図2にその一例を示す。これは、長さ100cmの台の上に、光弾性物質で作成した模擬砂をおよそ、2900個積んだ時の光弾性写真である。暖色系で示されている部分が歪の大きい部分であり、それが連なって応力鎖を形成している様子が可視化されている。

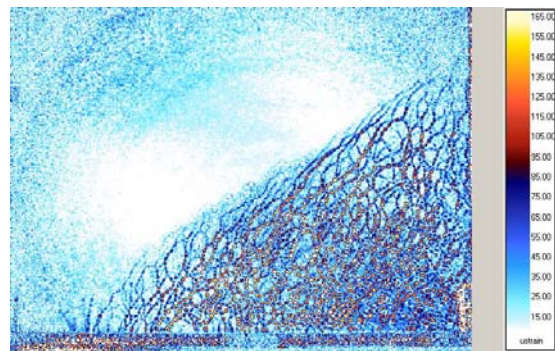


図2 光弾性物質で作成した模擬砂による砂山の内部構造写真。暖色系で示されている部分が歪の大きい部分であり、それが連なって応力鎖を形成している様子が可視化されている。

この図から、砂山の内部の応力状態は一樣ではなく、一部の砂が重力を支え、砂山を構成していることが明らかとなった。また、応力鎖はいくつものアーチ状の構造を形成している。

また、砂山の表面付近では、応力鎖は砂山の斜面に平行となり、上からの力を支えていることが分かる。

(2) 定量的解析手法の開発

砂山を形成してゆく各段階で、図2のような光弾性写真を撮り、観察することによって、内部構造の変化過程を知ることはできるが、これはあくまでも定性的な解析である。

この写真から定量的な解析を行うために、すでに3.(2)で述べたように、512×384ピクセルのデータをEXCELのデータとして排出し、数値データ（マトリックスデータ）として格納・保管した。

さらにこのデータから、解析に不必要な部分を除外し、指定した光強度以上の値を持つピクセルを抽出する。図3にこのようにして

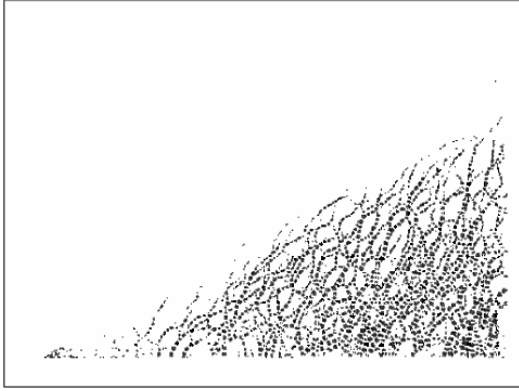


図3 指定した光強度以上の値をもつピクセルを描き出した例。

抽出したピクセルのみを描いた例を示す。

隣り合うピクセルが指定した値以上の値を持つ場合、それらを一まとめにしてクラスター（塊）として認識させる。大きなクラスターは数十個のピクセルからなる。図4 (a)は、図3の一部を取り出し、拡大したものであり、図4 (b)は、この中で隣り合うピクセル

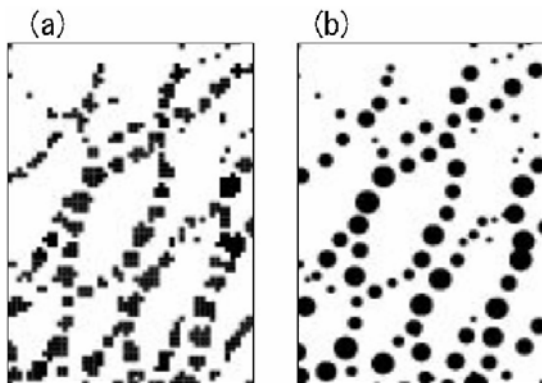


図4 (a) 一定以上の値を持つピクセル（黒色）の塊（クラスター）を自動認識させて、(b) 同面積の円で近似したもの。

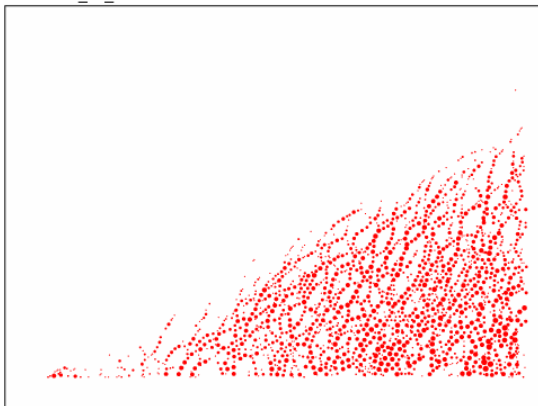


図5 図3のピクセルを、クラスター化した円で描いたもの。

ルを自動的にクラスターとして判別し、そのクラスターと同じ面積を持つ円で近似したものである。概ね、よい近似がなされている。これらの円の中心座標と半径は、基礎データとしてファイルに書き込まれ、保存される。

図5には、図3に描かれている、指定した値（この場合90）以上の値を持つピクセルを、クラスター化し、それぞれを円で近似したものを示す。

(3) ローズダイアグラム解析

このようにして作成したデータを用いて、「近接した円は互いに力を及ぼしあって応力鎖を形成している」と考え、その大きさや方向を計算して、応力鎖のローズダイアグラム（10度ごとの大きさ分布）を描いた。2つの円が近接しているか否かは、ある値を設定し、円間の距離がこの値以下かどうかで判断する。また応力鎖の大きさ（太さ）は、2つの円の大きさの平均に比例するものとする。

図6はこのようにして描いた応力鎖と、そのローズダイアグラム（左上インレット）を示す。データは図5に示したものと同一である。この場合、2つの円の近接度は2.0という値が用いられている（単位はピクセルの大きさ。dis=2.0がこれを示す）。このようにしてひかれた応力鎖の総本数は、1721本（nl=1721で示されている）である。約50度右上向きの応力鎖が卓越していることが分かる。

さらに光弾性写真を詳細に観察すると、表面付近では次第に表面に平行な応力鎖が発達していくことに気付く。とくに大崩壊直前には、これが極めて顕著になるので、これを定量的に表現するために、図6で示した手法を、表面付近のクラスターのみにも適用した。

表面付近は応力が小さく、この付近の応力鎖を把握するためには、光強度の閾値を小さ

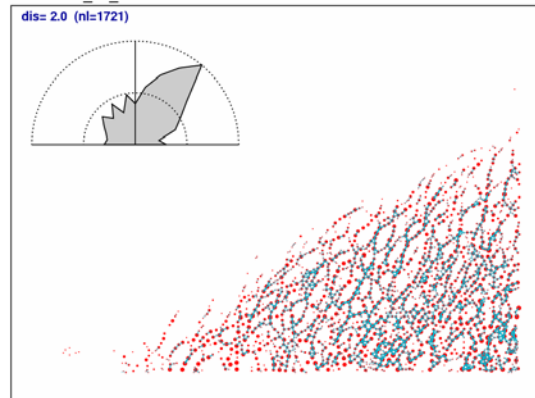


図6 近接する円を結んで描いた応力鎖（青色）と、そのローズダイアグラム（左上インレット）。

くすることが必要である。閾値を下げ、表面付近のクラスターだけを使って応力鎖を描いた結果を図7に示す。深い部分はクラスターが多すぎて、応力鎖の解析を行うことは意味がないが、表面付近については、応力鎖が表面に平行に発達している状況が明瞭となっている。

図7に示したものは、図8に示した一連の実験で得られたもののうち、42の番号で示されたものである(図中、黒丸で示したところが、光弾性写真を撮ったところである)。すなわち、100cmの台に積み上げられた砂が、大きく崩壊する直前のものである。このようにして得られたローズダイアグラムの時系列変化を図9に示す。

図9で示したローズダイアグラムの大きさは、図8に示した一連の写真のうちで最大値を示したものの、すなわち、42番の30度方向の値で規格化してある。

これを見ると、大きな崩壊を起こす直前の応力鎖は、非常に低角になると同時に、大き

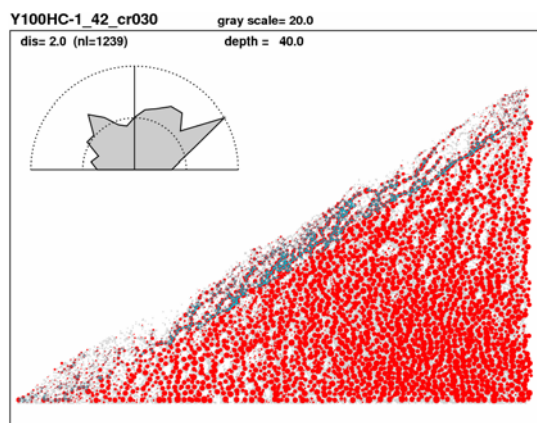


図7 砂山表面付近の応力鎖の構造とそのローズダイアグラム(左上インレット)

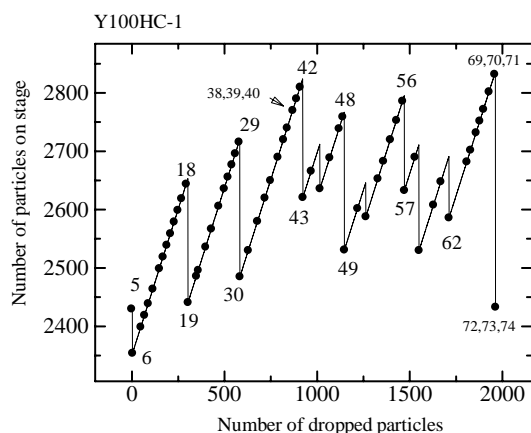


図8 100cmの台上の粒子数の変化. 番号は光弾性写真の番号. 3つ書かれているのは、光源の向きを変えて撮影したもの。

な値を示すようになる。図9では42番と48番がこれに相当する。

崩壊を起こしたあとでは、応力鎖の大きさは全体として減少し(43番や49番を見よ)、またこれが次第に成長して臨界状態に向かうと考えられる。

小さな砂山(台の大きさが50cm以下のもの)では、このような明瞭な構造(斜面に平行な強力な応力鎖の成長)は見られないし、このため常に小さな崩壊に終始する。これが大きな砂山と小さな砂山の崩れ方の違いをもたらす原因ではないかと考えられる。

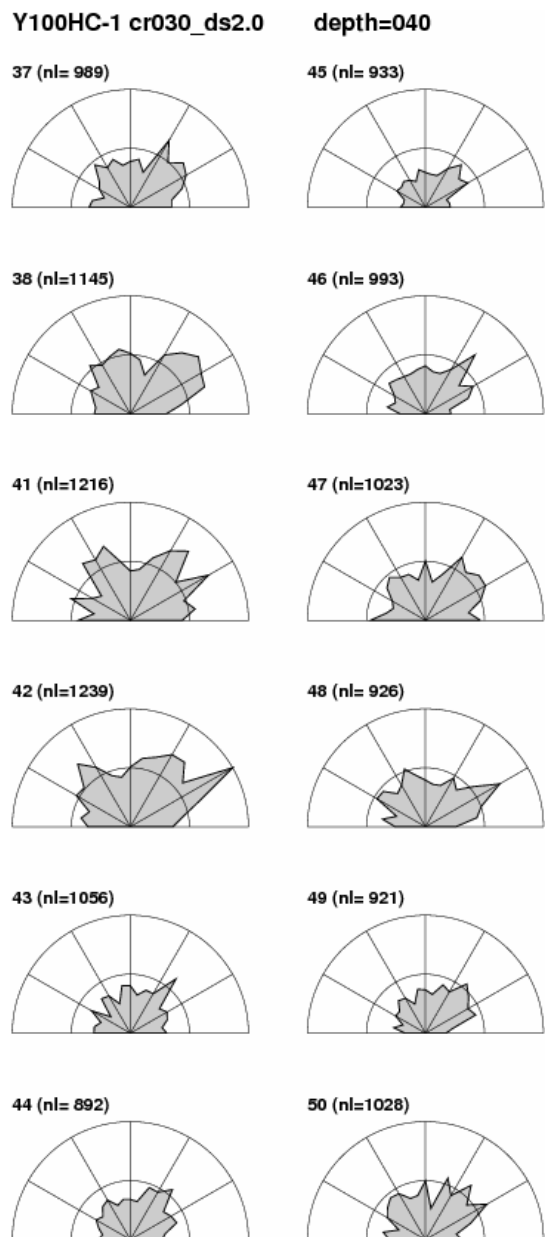


図9 ローズダイアグラムの時系列変化. 番号は図8に示されたものに対応している. 絶対値の大きさは、この系列の最大値(42の30度方向の大きさ)で規格化してある。

(4) 粒子数変化による内部構造変化

砂粒を次第に増加させた時、内部の応力状態はどのように変化するかを見るために、連続した2枚の写真の差をとって比較することを試みた。ここでは、図8に示された48番の直後に起きた比較的大きなナダレに着目し、その直前にどのような変化があったかを見ることにしたい。

図10にその結果を示す。図の上に示した番号は、図8に示された番号に対応し、たとえば46-45は、46から45を引いたことを表す。赤い部分がプラスの変化（光度の数値が大きくなった変化）を、青い部分がマイナスの変化（同小さくなった変化）を表している。

最下段の49-48と書かれたものは、ナダレの前後の変化であるから、変化が大きいのは当然である。ナダレによって、かなり深い部分まで影響を受けていることが注目される。逆に、表層から深い部分では、ナダレによっても全く変化をしていない部分があることにも注目する必要がある。

48-47は大きなナダレが起きる直前のものであり、47から48に至る間に20個の粒子が加えられている。この間の変化は極めて小さい。

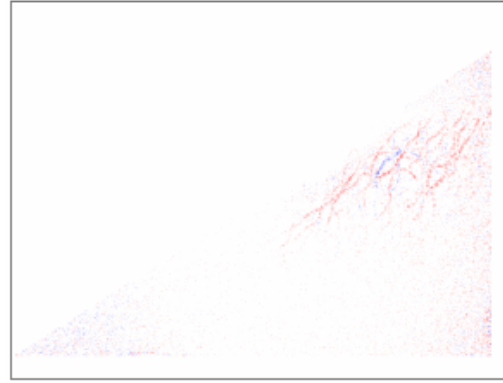
その上の47-46と46-45は、加えられた粒子数は約50個であり、48-47の変化と直接比べるわけにはいかないが、それでも大きな変化を示していることは間違いない。すなわち、臨界状態に向かう途中の段階では、加えられた粒子によって応力の再配分が内部で大きく行われていることを示している。これに対して、臨界状態に近づくにつれて、新たに加えられた応力は均等に配分され、見掛け上、変化が少なくなるのではないかと考えられる。これは、地震前の静穏化現象に対応しているとも考えられる。

しかしこの点については、今後詳しく検討する必要がある。

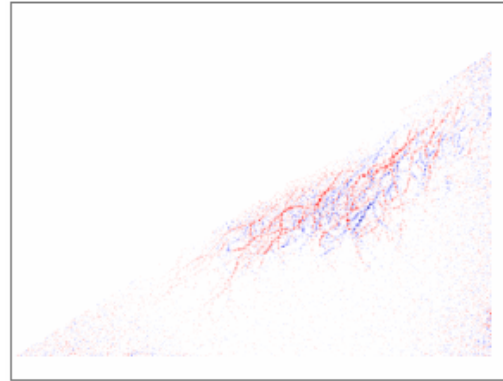
参考文献

- Bak, P., C. Tang, and K. Wiesenfeld, , *Phys. Rev. Lett.*, 59, 381-384, 1987.
- Schwartz, D. P., and K. J. Coppersmith, *J. Geophys. Res.*, 89, 5681-5698, 1984.
- Yoshioka, N., *Earth Planets Space*, 55, 283-289, 2003.
- 吉岡直人, 深田地質研究所年報 No. 11, 117-127, 2010.
- 吉岡直人, 深田地質研究所年報 No. 12, 95-103, 2011.

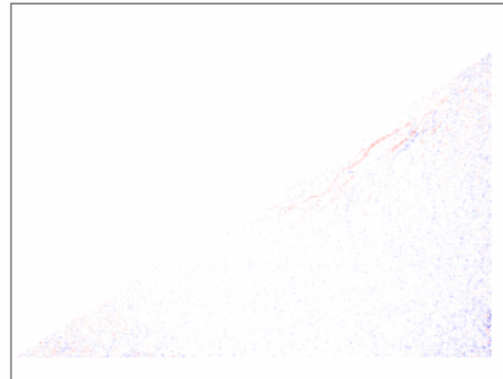
Y100HC-1 46-45



Y100HC-1 47-46



Y100HC-1 48-47



Y100HC-1 49-48

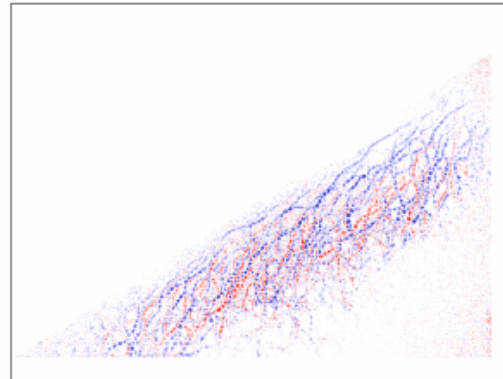


図10 隣り合う2つの写真の差をとったもの。+の変化は赤で、-の変化は青で表わされている。