砂山崩し実験における連動性の観察(2)

吉岡直人

深田地質研究所

An observation of consecutive events in sandpile experiments (2) YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨:昨年に引き続き,八角形の受け皿を用いて砂山崩し実験を行った。すなわち,8 つの斜面を独立したセグメントと見做し,その連動性を観察した。データは昨年同様,砂山全体の重量変化と,一定時間間隔で砂山上部から撮った写真である。データの採取方法や,解析方法にはかなりの改良を加えた。とくに,重量データと写真のデータを組み合わせた解析方法を開発し,各セグメントの状態の時間変化を追跡することが可能となった。この結果,大きな崩落は,グーテンベルグ-リヒター則に従う小さな崩落とは明瞭に区別すべきものであること,大きな崩落を起こしたセグメントは,その後余震活動を連想させる活発な砂移動を起し,全体としてそれが治まったころ次の大崩落が起きることが見てとれた。しかしながら,次の大崩落が、どの場所で,連動性を含めてどの程度の規模で起きるかを予測することは,極めて困難であることも明らかとなった。キーワード:砂山崩し実験,連動,セグメント

Abstract: Following the last year, I have performed sandpile experiments using an octagonal disk. The pile is a pyramid having 8 independent surface segments. The consecutive events between them were observed. The data are the change in the total weight of the sandpile and the photographs of the pile taken from an above point with a constant time interval. The methods of data acquisition and data analysis were greatly improved. In particular, I developed the analytical programs in which the weight data and the photo data were assembled. Thus the time traces in the weight of each segment were able to be obtained. We found that the large events should be clearly distinguished from other small events which obey the Gutenberg-Richter law, and that the segments at which a large event occurred become very active after the event. This reminds us of aftershock activity. The next large event seems to occur when the activity becomes calm. However, it appears that it is very difficult to forecast where and how large the next large event will be.

Keywords: sandpile experiment, consecution, segment

1. はじめに

昨年に引き続き、砂山崩し実験における連動性の観察を行ったので、その結果を報告する。そもそも何故砂山崩しの実験を行うかについては、Yoshioka (2003)、Yoshioka and Sakaguchi (2008)、吉

岡 (2009a, 2009b; 2011; 2012a; 2012b) などを参照 していただきたい.

ここで、昨年報告した実験内容を簡単に復習しておこう。砂山を形成する受皿を八角形にし、砂山を角錐として、各斜面を独立したセグメントと考える。一定時間間隔で上から写真をとり、640

×480 ピクセルの数値データとして保管する.連続した写真の「差」をとり、その間の変化がどの場所であったかを把握する.このようにして、大きな崩落があった場合には、その崩落はどの斜面が崩れたかを知ることができる.すなわち、どのセグメントが「連動」して崩落したかを把握でき、崩落直前の様子も合わせて観察できる.この結果、大きな連動を伴う崩落では、その開始点となったセグメントは、直前に静穏化、すなわち変化が小さくなるのではないかと推察された.

昨年から実験方法に関して改良を加えた点は以下のとおりである. (1) 崩れ落ちた砂を受ける面に、八角形の外壁を付けた. (2) 受皿の下にも八角形の内壁をつけた. (3) 受皿を 22.5° 回転させて、砂供給用ロッドが角錐の稜線上に来るようにした. (4) 砂供給用ロッドを細くした. (5) 重量測定用のPCと写真を撮影するPCを別々のパソコンとした.

(1)~(4)については図1を参照されたい.この写真は実験で砂を供給する前のセッティングの段階で撮ったもので、八角形の外壁と、透明の受皿の下に八角形の内壁も映って見える.外壁は、砂がこぼれ落ちる部分の面積を、各セグメントで異な

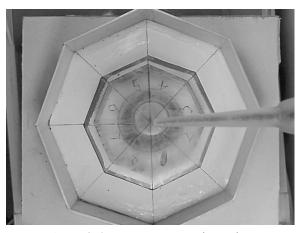


図 1 今回の実験に用いた受皿と外壁,内壁の位置と 方向.及び砂供給用ロッド.

らないようにするためである. すなわち,変化したピクセルの数をカウントする際,各セグメントの条件を同じにしておく必要があるからである. また内壁は、やはりこぼれ落ちた砂が、受皿の下に潜り込んで見えなくなることをできるだけ避けるためである.

- (3) の受皿を 22.5° 回転させたのは, (4) の砂供 給用ロッドを細くしたことと相俟って, セグメントの変化を少しでも多く捉えるためである. 昨年は③のセグメント上に太いロッドがかぶさる構造になっていたため, ③のセグメントの変化はほとんど捉えることができなかった. 今回はロッドを細くし, さらに変化の比較的少ない稜線上に配置させることにより, この点が大幅に改善された.
- (5) は、1つのパソコンで重量変化と写真撮影を行うと、負荷がかかりすぎるためか、重量測定に欠測が生じることが判明したためである。 1 H z の測定間隔で、約 40 時間の重量測定を行った場合、多い時には 120 秒の欠測が現れた場合があった。これが連続した欠測であるのか、飛び飛びであるのかは判然としない。しかし、2台のパソコンで別々に測定するようになってからは、この問題は生じなくなった。

2. 実験方法

「1. はじめに」の部分で、昨年の報告時点の実験方法に改良を加えた部分を述べたが、基本的な実験方法は昨年と同様である。すなわち、使用した砂は粒径が 0.25-0.5 mm のものであり、この砂を 0.137 mg/s の速度で受皿上に落下させた。粒子 1 個の平均重量は、0.075 mg 程度であるから、1 秒間に平均して約 2 個の粒子が受け皿に供給されたことになる。

図2に、図1で示したものに模式的にセグメン

ト番号を付して示す. 受皿は内側の八角形で, セグメント番号を右下から①②…⑧と反時計回りに付ける. 外側の八角形は外壁であり, この内側に砂がこぼれ落ちる部分があるが, セグメント番号は皿上と同じとする.

砂供給ロッドは、セグメント番号②と③の間の 稜線上に来るが、斜面およびこぼれ落ちる部分の 大半はロッドによって隠されることなく見えてお り、セグメント②③の全移動量および全落下量は、 見えている部分と隠れている部分の面積比から、 比例配分によって補正した.

全測定時間は40~60時間程度であり、この間に大きなナダレ(崩落)は十~二十数回程度発生した.

写真は基本的に5分間隔で撮影した(延4日間の場合は6分間隔). したがって、総写真枚数は500~600枚程度となった.

WEB カメラで、 640×480 ピクセルの JPEG 画像として取り込まれたデータは、グレースケール

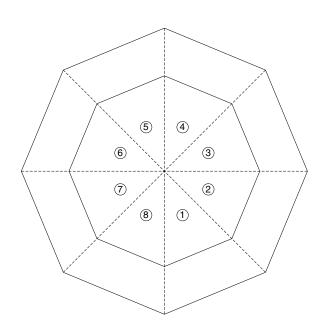


図 2 八角錐(内側)と外壁(外側の八角形)を上から見た図.セグメント番号は右下から反時計回りに①②…⑧とする.砂がこぼれ落ちる部分もセグメント番号は同じ.

の値を数値データに変換して保存した. これも昨年と同様, ImageJ というフリーソフトで行ったが,同ソフトに付随している機能,マクロ処理を使用して自動化することにより,500~600枚の画像を数値データ化するのにおよそ 10 分程度の時間で行うことができるようになった.

3. 実験結果

前回も述べたが、砂を受皿の中心に正確に落と すのはかなり困難で、多くの場合、偏ったセグメ ントだけが崩落することが多い、すべてのセグメ ントに均等に砂が配分されたというデータは数え るほどしか採れていない。

その中で、すべてのセグメントが大きな崩落に 関与した場合の例を示す。図3はこの実験(試験 名140811-1)における、受皿とロッド位置の配置 関係を示したものである。ロッドは②と③の中心 より②側に偏っているように見えるが、これはロッドが回転していて、砂はロッドの中心から落ち るのではなく、回転方向に引きずられて落ちるためと思われる。

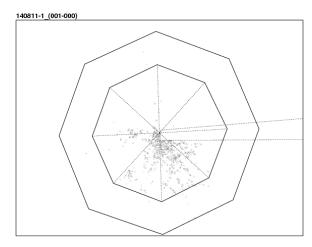


図3 試験名 140811-1 における, 受皿とロッドの位置 関係.

図4にこの試験の全重量変化と、これに対応した崩落の大きさの棒グラフを示す。崩落の大きさは一様ではなく、最大2gを超えるものから、0.5g程度の小さな崩落も見られる。

特徴的かつ重要なことは、この図には明瞭には 現れていないが、小さな崩落は非常に多数発生し ており、この統計的な規模別頻度分布はグーテン ベルグ・リヒター則に従い、Bak et al. (1987)の提 唱した自己組織化臨界現象の典型例とされるので ある. それらの崩落とは明瞭に区別されるべき 13 個の大きな崩落が図4に示されており、ここでの 研究対象である. 地震になぞらえれば巨大地震に 相当し、いくつかのセグメントが同時に(連鎖的 に)崩落したものが多い.

図 4 に示される崩落のうち、最大のものは 26 時間 30 分 27 秒に発生した 2.18 g の崩落である.

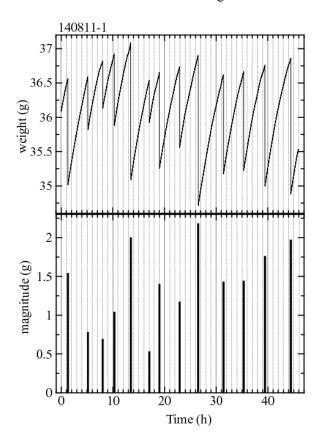


図4 上:全重量変化. 下:崩落の大きさ.

これについてその経過を追ってみよう.

図5にこの崩落に至るまでの砂の移動経過を示す。それぞれの図は、5分間隔で撮った連続する写真の差をとったものであり、黒い部分が、5分間に砂の移動の大きかった場所である。図の順序は、左上から下へと進み、右列の上から下へと進む。右下の図が、大崩落を挟む2つの写真の差をとったものであり、この図から、この大崩落はセグメント番号⑤⑥⑦⑧①の連動であったことが分る(④は斜面上での砂の移動は見られるが、外側には変化が見られないので除外)。

このような観察を行い、図 4 の下に示した 13 個の大崩落についてどのセグメントが崩落したか

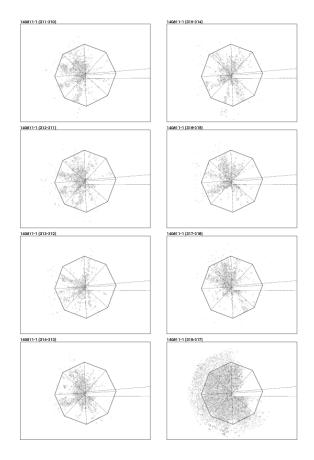


図5 大崩落に至る砂の移動経過. 右下が大崩落を挟む2枚の写真の差. 図の順は左上から下へ, 右上から右下へ.

を、時空分布で示したものが図6である. 横軸が セグメント番号(場所)、縦軸が時間である. 崩落 を起こしたセグメントが横棒で示されている. た だし、この図では、図4の下に示された崩落量を、 崩落に関与したと判断されたセグメントの数で単 純に割ったものをそのセグメントの崩落量として いる. すなわち均等配分である. 線は、1つのセ グメントが崩落した量に比例した太さで描かれて いる.

この図をみると、ほとんどの崩落が「連動」によって引き起こされていることが分る。単独で崩落したのは6番目の0.53gの崩落だけである(セグメント①のみ)。最大の崩落では5つものセグメントが連動して崩落している。

さて、重量データおよび一定間隔で撮った写真

140811-1

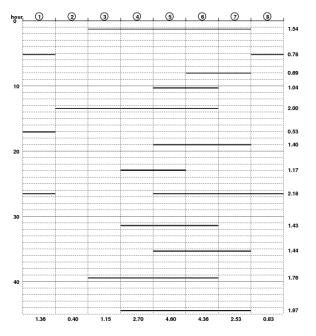


図 6 試験 140811-1 における大崩落の時空分布. 縦軸が時間, 横軸①~⑧は図2に示したセグメント (場所)を表す. 右の数字は崩落の大きさ(重量, g). 下の数字は, 各セグメントの, 大崩落によっ て落下した砂の総量(g).

データのすべてを総合して、各セグメントにおける状態変化を推定するために、次のような解析を 行った.

図7は大きな崩落が起こっていない時の、砂の 移動を示す例(2枚の写真の差をとったもの)で ある. この例では受皿(内側の八角形)上の砂の 移動と、皿からこぼれ落ちた砂が観察される. こ の2枚の写真の間隔は5分(300秒)であるので、 この間に砂山に供給された砂の重量は、0.000137 $g/s \times 300 s = 0.0411 g$ である. しかし, 砂山の重量 はこの分増えておらず、不足した分がこぼれ落ち た砂と考えられる. こうして、砂山に残った砂の 量と、こぼれ落ちた砂の量を把握できる。このそ れぞれの量を各セグメントに分配するために、各 セグメントに現れた黒いピクセル数を利用する. すなわち、黒いピクセル数に比例させて、どのセ グメントにどれだけの砂が供給され、またどのセ グメントからどれだけの砂がこぼれ落ちたかを計 算する. 先に述べたように、②と③のセグメント については、見えている部分と隠れている部分の 面積比から, 比例配分によって補正した.

また大きな崩落が起きた場合については、崩落

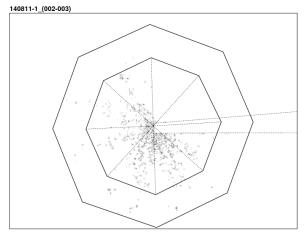


図 7 崩落が起こっていない場合の,砂の移動を示す一 つの例.

に関与したセグメントの変化は著しく大きい(図5の右下参照)ので、この方法は使えない.この場合は、崩落に関与したセグメントは外部に落ちた砂の量だけ減少したとし、それ以外のセグメントについては変化がなかったと仮定した.

このようにして求めた、セグメント別落下量の 時系列を図 8 に示す.最上段は砂の総重量(図 4 の上段と同)であり、①~⑧が各セグメントの落 下量,最下段(赤で示す)がその総量である.縦軸のスケールは① \sim 8が1g,総量は2gである.

これを見ると、大きな崩れの無いときの落下量は極めて少なく、1gというスケールではほとんど見られない. それは、5分間に供給される総量が0.0411gであり、それがいくつかのセグメントに配分され、さらにその一部が落下していることを考えると当然であろう.

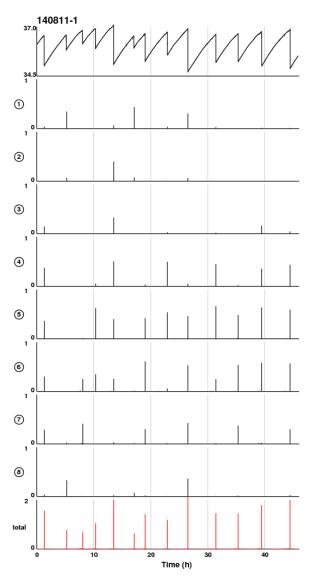


図8 セグメント別砂落下量. 最上段は砂の総重量(図4の上段と同). 最下段は落下の総量.

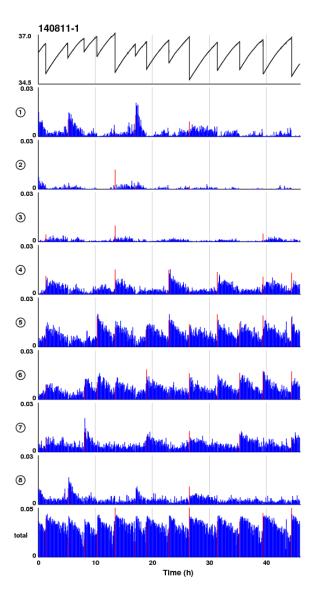


図 9 皿上の各セグメントの重量変化. 最上段は砂の 総重量(図4の上段と同), 最下段は①~⑧の総量.

次に皿上への砂の供給量をセグメント別に見てみよう。図9にこれを示す。図8と同様,最上段は砂の総重量(図4の上段と同)であり,①~⑧が各セグメントへの供給量,最下段がその総量である。縦軸のスケールは,①~⑧が 0.03 g,総量のスケールは0.05 g である。ただし,大きな崩落が起こった場合は,図8に示した落下量を赤で示した(スケールは図8と同)。この場合は,先に述べたように,各セグメントへの分配が計算できないからである。

この図から、あるセグメントで大きな崩壊があると、その後、集中的にそのセグメントへの砂の供給が行われ、それがある程度おさまった時に、次の崩壊が発生する、ということを繰り返しているように見える。しかし、例外もあり、5番目の大崩落の時の②③セグメントは、崩落の前後で大きな変化は見られない。この理由についてはよく分らないが、崩落後の砂の供給量が少ないことから、その後の崩壊にもほとんど関与していない。

以上のように、大きな崩壊があった場合と、それ以外の場合を区別し、各セグメントの砂の量の変化を求めた。すなわち、大きな崩壊の無い場合は、各セグメントに供給された砂の量の積算値を求め、大きな崩壊があった場合、その崩壊に関与したセグメントは、落下した量だけ減少させる。関与しなかったセグメントは変化なしと仮定した。このようにして求めた各セグメント別砂重量の変化曲線を図10に示す。セグメント⑤⑥は多くの大崩壊に関与しているため、激しく変化しているが、全体としてはほぼ均衡を保ちながら推移している。セグメント⑥⑤は全体としてやや減少傾向があり、セグメント⑦⑧は全体としてやや減少傾向があり、セグメント⑦⑧は全体として増加しているように見えるが、おそらくこれは誤りで、ここで仮定したモデルに問題があるのかもしれない。

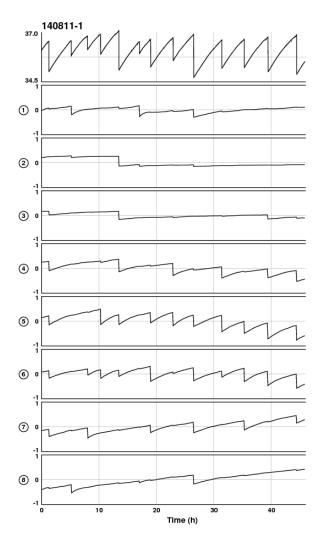


図 10 各セグメントの重量変化. 最上段は砂の総重量 (図 4 の上段と同).

4. 考察

重量測定と、一定間隔の写真データから得られる情報を最大限使用して、各セグメントの変化を 追跡した.

繰り返しになるが、ここで解析の対象となった 13個の大きな崩落は、それ以外の、常時みられる 小さな崩落とは明瞭に区別されるべきもので、地 震で言えば、グーテンベルグ・リヒター則に従わ ない、巨大地震に匹敵するものと考えられる(た とえば、Yoshioka、2003)。それ故、本研究におけ る解析においても、これら 13 個の崩落については、 他の部分とは異なった処理を余儀なくされた. そ れはある意味で理にかなったことと言える.

こうして、各セグメントという、場所をも考慮 した解析が可能となり、その時間変化についても ある程度追跡ができるようになった.

大崩落があったセグメントでは、その後、砂の 供給が増え、セグメント上での砂の移動が活発に なり、それが次第に減少していくという様子は、 余震活動の減衰を連想させるもので興味深い.次 の大崩落は、全体としてこの余震活動がある程度 落ち着いたところで発生することは図9からも見 て取ることができる.

しかしながら、次の崩落がどの場所で、どの程度の規模で(連動性も含めて)発生するのか、という「予測」の問題については、極めて困難であることも明らかとなった。この問題こそが、本研究の目標であったが、その解明には至らなかったし、未だその糸口さえ見出せていないのが実情であると言わざるを得ない。

砂山崩しという、比較的単純な現象でさえこの 有様であるから、地震というより複雑な現象の予 測は、かなり困難ではないかという、悲観的な印 象を深くしている.

言い訳ではないが、この研究の原動力ともなっていた、寺田寅彦 (1932) の次の言葉を引用して、本論の締めくくりとしよう.

「その当代の流行問題とはなんの関係もなくて、物理学の圏外にあるように見える事がらの研究でも、将来意外に重要な第一線の問題への最初の歩みとなりえないとは限らない。それでそういう意味で、現在の物理学ではあまり問題にならないような物理的現象にどんなものがあるかを物色してみるのも、あながち無用のわざではないかもしれない。」

参考文献

- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987): Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise Phys. Rev. Lett. 59, 381-384.
- 寺田寅彦 (1932): 物理学圏外の物理的現象, 理学界.
- Yoshioka, N. (2003): A sandpile experiment and its implication for self-organized criticality and characteristic earthquake, Earth, Planet and Space, 55, 283-289.
- 吉岡直人 (2009a): 砂山崩しと地震 その1—, 深田地質研究所ニュース, 101,5-8.
- 吉岡直人 (2009b): 砂山崩しと地震 その2—, 深田地質研究所ニュース, 103,9-16.
- 吉岡直人 (2011): 砂山の臨界状態と大崩落の予測の試み―光弾性物質を用いた内部構造の解明―, 公益財団法人深田地質研究所年報, 12, 95-104.
- 吉岡直人 (2012a): 砂山崩し実験から地震予測法 を探る試み, 材料, Vol.61, No.8, 675-679.
- 吉岡直人 (2012b): 砂山崩し実験結果の多様性,公 益財団法人深田地質研究所年報,13,95-108.
- Yoshioka, N. and Sakaguchi, H. (2008): Looking into a sandpile by photo-elasticity and discrete element method, in *Advances in Geosciences*, Vol. 13, Solid Earth (ed. K. Satake), World Scientific, 281-290.