

砂山崩し実験における連動性の観察

吉岡直人

深田地質研究所

An observation of consecutive events in sandpile experiments

YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨：多角形の受け皿を用いて砂山崩し実験を行った。円ではなく多角形（八角形）を用いることにより、砂山は角錐となり、その斜面はいくつかのセグメントに分割され、それぞれを独立した斜面とみなすことができる。ナダレは1つのセグメントの崩壊として発生することも多いが、複数のセグメントが同時多発的に崩壊して大きなナダレになることも稀ではない。これを「連動」とみなす。どのセグメントが崩壊したのかを観察するために、WEBカメラで一定間隔ごとに写真を撮り、ナダレの前後を比較した。この結果、大きなナダレは隣接するセグメントが同時に崩壊して発生することが確かめられた。また、砂の落下点を受け皿の中心からずらすと、同じ部分が毎回崩れるため、ナダレの周期と大きさに規則性が現れるが、落下点を中心付にすると、周期も大きさも規則性が減少する。この場合、ナダレの起こる時期と大きさを予測するのはかなり困難であるが、複数のセグメントが連動する場合、その中心となるセグメントの変化は直前になって小さくなる（静穏化）ことが見いだされた。その詳しいメカニズムの解明は今後の課題である。

キーワード：砂山崩し実験、ナダレ、連動、セグメント、静穏化

Abstract: Sandpile experiments have been performed using, not a circular, but a polygonal (octagonal) disk. Thus the pile becomes a pyramid, the surface of which is divided into several segments. Each segment is considered to be an individual surface. Avalanches sometimes occur on a single segment and sometimes on several segments simultaneously, resulting in a large avalanche which is regarded as a consecutive event. We used an WEB camera which takes images of the sandpile with a constant interval, in order to identify the location of avalanches by comparing the two images taken before and after a large avalanche. A large avalanche occurs as a result of successive collapses of adjacent segments. We found that when the drop point of sand onto a sandpile misses the center of the disk, the occurrence of large avalanches becomes periodic and regular because the same segments collapse every time, whereas when it matches the center of the disk, it becomes irregular so that it is very difficult to forecast the time and the magnitude of the next avalanche. However we found that the main segment of the next avalanche becomes calm (quiescent) just before the avalanche. The elucidation of detailed mechanism of the quiescence will be a future work.

Keywords: sandpile experiment, avalanche, consecution, segment, quiescence

1. はじめに

筆者はこれまで、地震の発生の仕方と、砂山崩し実験における砂山の崩れ方の類似性に着目して、

砂山崩しの実験を繰り返し行ってきた (Yoshioka, 2003; Yoshioka and Sakaguchi, 2008; 吉岡, 2009a, 2009b; 吉岡, 2011; 吉岡, 2012a; 吉岡, 2012b). これまでの実験によって得られた結論は、砂山の

ナダレの規模別頻度分布がべき乗則に従う場合、すなわち地震でいえば、グーテンベルグ・リヒター則に従う場合と、ほぼ同様の大きさのナダレが規則的に発生する場合、すなわち地震でいえば固有地震的に発生する場合とに分けられ、この両者を分けるのは、砂の径と受け皿の直径の比である、ということである。なぜこのようなことが起きるのかについては、光弾性物質を用いた実験によってその内部構造を解析することにより、定性的にはあるが推定されている (Yoshioka and Sakaguchi, 2008; 吉岡, 2011)。

しかしながら、砂山崩しの実験結果には必ずしも完璧な再現性があるわけではなく、むしろ多様な結果もみられることも報告されている (吉岡, 2012b)。砂の径と受け皿の比が大きくなり、ナダレの発生の仕方が固有地震的となり、大きなナダレが周期的に発生するようになった場合でも、その大きさや時間間隔は必ずしも一様ではなく、かなり変化に富む場合もあることが分かってきた。円形の受け皿を用いた実験でも、大きなナダレが発生する場合、ある一定方向の斜面が崩れる場合もあれば、ナダレが円周方向に移動しながら連続的に発生し、結果的に非常に大きなナダレとなる場合もある。これは隣り合った斜面がある意味で連動して発生したようにも思える。

このような「連動性」をよりはっきりさせるために、円形の受け皿ではなく、多角形の受け皿を用いることを考えた。多角形の受け皿を用いるということは、砂山の斜面をいくつかのセグメントに分割するということであり、これまでのように、砂山の全重量の変化という、一次元的な量を観察するだけでなく、どの斜面 (セグメント) が崩れたか、という情報も重要となってくることを意味する。

多角形の受け皿を用いた実験については、前報

(吉岡, 2012b) でも一部紹介したが、今回報告する実験では、上記のように、崩れた斜面の位置を把握するための新たな工夫もされている。

このような実験を思いついたのは、2011年の東北地方太平洋沖地震が連動型であると捉えられている場合があり (たとえば有吉ほか, 2011)、また、従来から指摘されている、南海トラフ沿いの地震 (たとえば, Mogi, 1970; Ando, 1975a, 1975b; 石橋, 1976; 石橋・佐竹, 1998) の連動性がかまびすしく語られ始めているからである (中央防災会議, 2013a, 2013b)。しかしこれに対しては、必ずしも単純な「連動」という概念では捉えられないという議論もある (たとえば, 瀬野, 2012)。Seno (2003) は、アスペリティモデル (Lay and Kanamori, 1981) に対して、階層構造をもつ新たなモデルを提唱しており、セグメントや固有地震という概念にも再考の余地があると述べている (瀬野, 2012)。

いずれにしても、隣接した領域が相互作用の結果、ほとんど同時に動くことがあるのは事実であり、これを単純で繰り返し可能な砂山崩し実験で再現し、その発生条件を探ることが本研究の目的である。

2. 実験方法

実験装置の主要部分については、前報 (吉岡, 2012b) で詳しく紹介したので、ここでは省略するが、その基本構造は、回転するパイプを通して、受け皿の上に砂が一定速度で供給されるというものである (吉岡, 2012b 図 1(b)参照)。砂の供給速度は、パイプの回転速度で制御されるが、今回の実験では最低の速度、すなわち 1 pps (パルス/秒) で落下させた。使用した砂は bsb (粒径 0.25-0.5 mm) であり、この砂では 0.137 mg/s の落下速度である。粒子 1 個の平均重量は、0.075 mg 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。このような遅い速度で砂を供給したのは、落下する砂が複数同時に落ちることによる相互作用を避けるためである。すなわち1つ1つの砂が準静的に砂山斜面に供給され、自己組織化的に臨界点に達すると考えられる。

しかしながら、このように遅い速度で落下させると、大きなナダレの発生間隔は数時間以上となる。このため、大きなナダレをかなりの回数発生させるには、1回の実験に3、4日の時間が必要となる。

さて、「はじめに」の部分で述べたように、今回の実験の目的は砂山重量の時間変化だけでなく、どの部分が崩れたかという情報も得ることである。3、4日という長時間の間、どの部分が崩れてナダレが発生したかを「監視」するために、一定間隔で写真を撮り、ナダレの前後の写真を比較することにより、これを行うことを試みた。図1にこのために、新たに実験装置に加えたWEBカメラと、LEDライトの様子を示す。

WEBカメラは砂山の真上に取り付けられてい



図1 写真撮影のための装置。WEBカメラと2個のLEDライト。

るので、パイプの部分は砂山斜面の視界が遮られる(図2参照)という問題はあるが、それ以外の部分は砂山斜面上での砂の移動や、落下した砂の変化が明瞭に捉えられる。

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、その後、ImageJというフリーソフト(アメリカ国立衛生研究所(NIH)で開発された画像処理ソフトウェア)で、各ピクセルのRGBの値、またはグレースケールの値を数値データに変換して保存した。このようにして保存したデータを、PostScriptの画像として再生した例を図2に示す。正八角形の受け皿の輪郭を書き加えてある。

このように数値データとして保存することによって、相前後する画像の「差」をとることができ、その間の变化から、どのセグメントが崩壊したかを知ることができる。

受け皿としては、主に正八角形のものを用いた。正六角形のものを用いた実験も行ったが、後で述べるように、ほとんど連動は見られなかった。いずれの場合も、底面積の大きさは、半径6cmの円

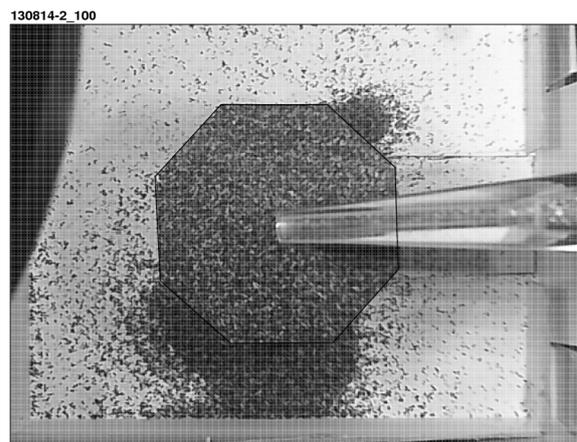


図2 WEBカメラで撮影した画像の例。元の画像はJPEG画像であるが、これを640×480ピクセルのグレースケールデータに変換・保存し、PostScript画像として再現したもの。八角形の受け皿の輪郭を書き込んである。

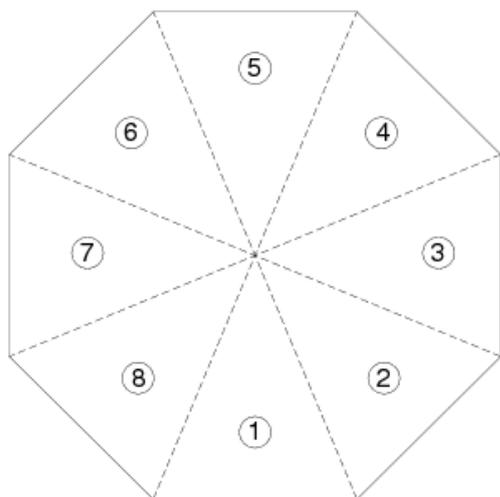


図3 八角錐を上から見た図. 各セグメントは手前から反時計回りに①②…⑧のように番号で呼ぶ.

と同じ大きさになるように設定した.

以後の記述では, 角錐の斜面の各セグメントは図3に示すように, 上から見て下手前のセグメントを①として, 反時計回りに②③…と番号を付けて呼ぶことにする. なお, 砂供給のためのパイプはセグメント③の真上にあり, この部分はパイプに視界が遮られて十分に変化を捉えることは困難であった.

3. 実験結果

3.1 砂山の重量変化と落下点位置の関係

砂山の重量はこれまでの実験と同様に 0.1 mg の精度で電子天秤で測定し, パソコンに取り込んで記録した. サンプル間隔は, 長時間にわたるものについては5秒 (0.2 Hz) を原則とした.

図4に砂山重量の変化曲線の例を二つ示す. 両者の横軸 (時間) と縦軸 (重量) のスケールはそろえてある. (a)に示したものは, 砂の落下点が角錐の頂点からセグメント⑦の方向にずれており, ⑦が主に崩れ, ⑥および⑧がそれにとまって崩

壊したものである. この場合は, 崩壊の間隔, 大きさが毎回ほぼ同様であり, 30時間程度経過した後は, 定常状態に入ったように見える. 崩壊の大きさは0.8g程度であり, 1gを超える崩壊はない.

これに対して(b)で示したものは, 落下点が受け皿のほぼ中心に位置していたと考えられるものである. このため, 崩壊したセグメントは毎回同じではなく, バリエティに富んだものとなっている (といっても落下点の若干の偏りは避けられず, 崩壊が殆んど見られないセグメントもあった). また崩壊の大きさも一様ではなく, きわめて小さい崩壊もあれば, 1.5gを超える崩壊もみられた.

このように, 砂の落下点の位置は, 砂山の崩れ方を規定する極めて重要な要素であることが分かる. 実験においては, 極力落下点を受け皿の中心に位置するように心がけたが, すべてのセグメントが均等に崩れるように落下点を設定することは極めて困難である.

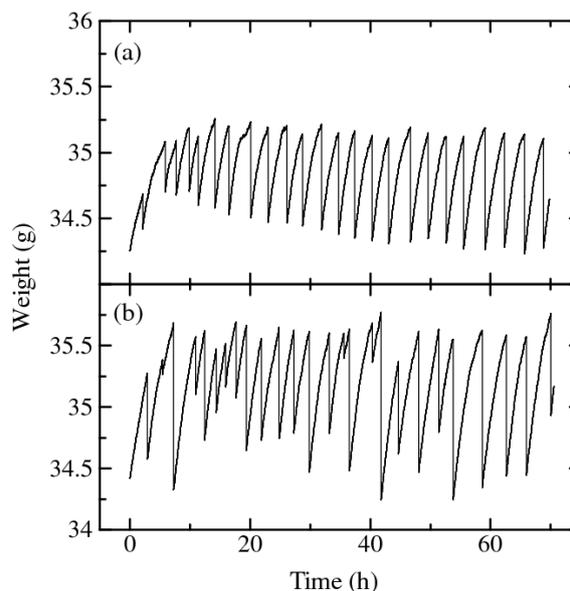


図4 砂山重量変化の例. (a) 砂の落下点の中心が角錐の頂点からずれている場合. (b) 砂の落下点がほぼ, 中心の真上にある場合. (本文参照)

3.2 連続する画像の差と崩壊位置決定

先にも述べたように、実験終了後、各画像の各ピクセルの値を数値化して保存し、連続した2枚の画像の、対応するピクセルの値の差をとることにより、どのセグメントが崩壊したかを判定した。2枚の画像の差を取ったものの例を図5に示す。黒く見える部分が「差」の大きかった部分であり、変化が大きかったことを示している。受け皿の輪郭を実線で、各セグメント間の稜線を点線で示している。

図5の(a)と(b)、(c)と(d)はそれぞれ同じ実験のものであるが、前者の撮影時間間隔(Δt)は1時間、後者のそれは10分である。(a)と(c)は2枚の写真の間に大きな崩落が無かった場合、(b)と(d)は大きな崩落があった場合である。

これを見ると、 Δt が1時間の場合には、図5(a)に見られるように、大きな崩落が無くても、その間の砂の移動は相当なもので、新たに受け皿からこぼれ落ちた砂の量もかなりの量にのぼることがわかる。図5(b)の崩落は②③④⑤⑥で起きたとも解釈できる(③はパイプの下で僅かな痕跡が見えるのみ)が、単に斜面上を移動した砂や、小崩落で落下した砂も含まれていると考えられるので、正確には大崩落でどのセグメントが崩落したかは定かでない。

これに対して図5(c)および(d)に示したものは、 Δt が10分であり、大崩落が無い場合には、受け皿の外側の変化はわずかである。図5(d)の場合、2枚の写真の間に、1.19 gのナダレが生じたことが分かっている。セグメント⑦の外側に大きな変化がみられること、およびセグメント⑦の斜面内でも砂の移動があったことが読み取れることから、⑦が崩壊したことが分かる。しかし、後述するように、1.19 gという量の崩壊は1つのセグメントの崩壊ではまかないきれない量であることも分か

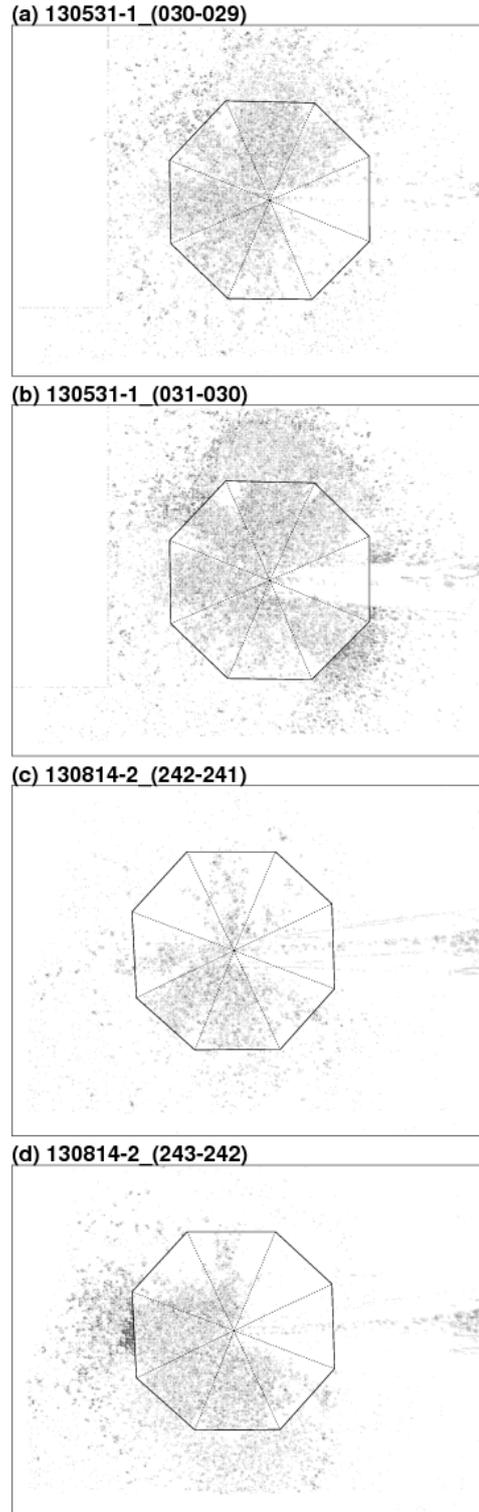


図5 連続する2つの画像の「差」の例。黒い部分が「差」の大きい部分。

(a) $\Delta t=1h$, 大崩落なし. (b) $\Delta t=1h$, 大崩落あり.
(c) $\Delta t=10m$, 大崩落なし. (d) $\Delta t=10m$, 大崩落あり.

っており、セグメント⑧および①もセグメント内およびその外側にも、変化がみられることから、

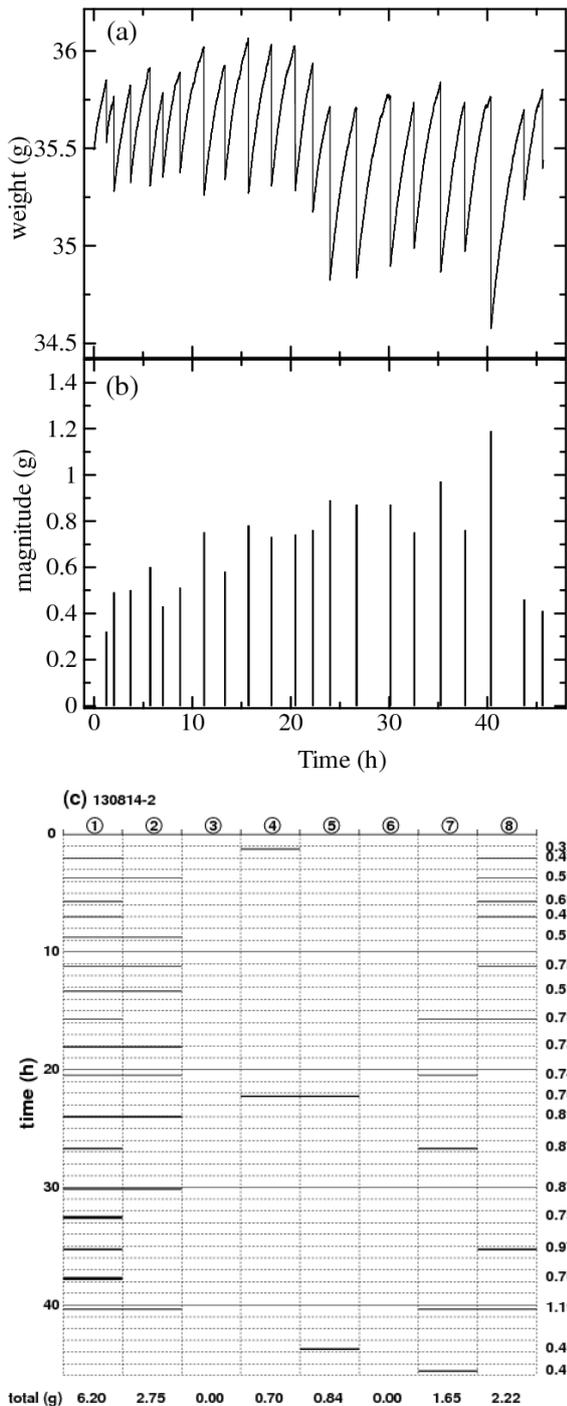


図6 ある実験(実験名 130814-2)における、(a)砂の重量変化、(b)ナダレ(大崩壊)の大きさ、および(c)崩壊の時空間分布図。

この崩壊は⑦⑧①のセグメントの連動であった、と判定される。セグメント②も連動した可能性もある。

以上のことから、撮影時間間隔 Δt は 10 分程度以下であることが望ましいことが分かる。

このようにして、それぞれの大崩壊がどのセグメントで生じたかを判定し、それを時空間ダイアグラムとして示したのが図 6(c)である。図中の横軸の番号①②…⑧は図 3 に示したセグメントに対応し、縦軸は時間である。同図(a)および(b)には重量変化と、各大崩壊の大きさ (magnitude, g) を示した。

図 6(c)には、崩壊したと判定された領域を横棒で示したが、線の太さは、崩落した量、すなわち図 6(b)で示した magnitude の量を、崩壊したセグメントの数で割ったものとした。図 5(d)に見られるように各セグメントの崩壊量は均等ではないが、今回の解析ではそこまで考慮できなかった。

図 6(c)の右側にはそれぞれの崩落の大きさ (magnitude, g) が示されており、グラフの下には各セグメントの総崩壊量が示されている。これによるとセグメント③と⑥は崩壊がなかったことになっているが、これは実験終了後の目視による観察ともほぼ一致しており、①⑧に集中していることも目視観察と一致する。

これをみると、単独で崩壊する場合は 0.5 g 以下の場合が多く、最大の単独イベントは 17 番目、19 番目の 0.75 g と 0.76 g である。これ以上大きな崩壊は必ず複数のセグメントが連動しているように思える。

また、まれにはあるが、隣接していないセグメントが同時に崩壊したと思われる場合も存在する (たとえば、20 時間経過直後の 0.74 g は①②⑦が崩壊したと判定されている)。

3.3 大崩壊直前の静穏化

大きな崩壊の直前の様子を詳しく観察するために、全体の時間は長くはないが、5分間隔で映像を取り込み解析した。この結果を図7に示す。

図7(a)はこの実験の砂山重量変化図、(b)はナダレ（崩落）の大きさ、右欄の(c)は2時間半頃の最大ナダレ直前の変化(029-028, 030-029) およびナダレ前後の変化(031-030)である。図7(a)および(b)の縦線（点線）は5分おきの線で、画像が取り込まれた時の時刻を表している。

図7(c)の最下図(031-030)に示されるように、この崩壊はセグメント①②③で起きたと判断される(③はパイプの影になっておりやや見にくい)。その直前の2枚の図を見ると、斜面上での砂の移

動はむしろセグメント④⑤付近が活発で、大崩壊を起こした①②③付近では変化がほとんど起きていない。これは①②③のセグメントの斜面がすでに臨界状態に達しており、砂はむしろそれ以外の斜面に供給される状態にあったのではないかと考

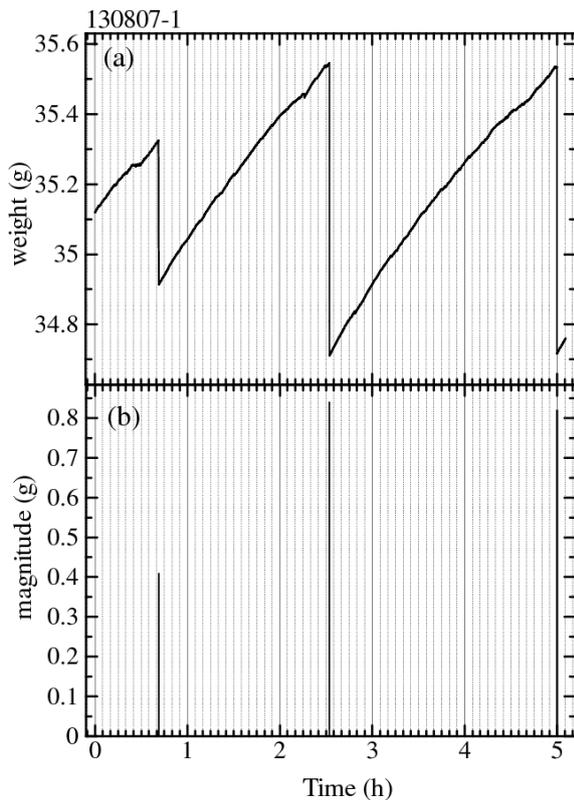
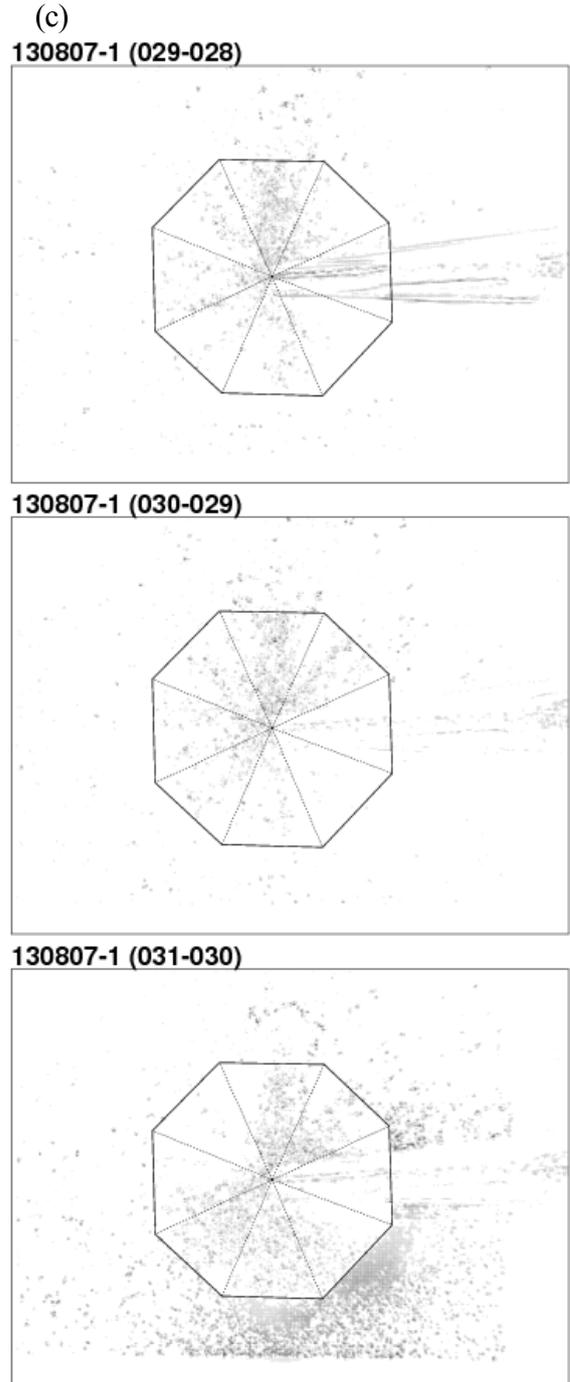


図7 ある実験（実験名 130807-1）における、上：(a) 砂の重量変化、(b) ナダレ（大崩壊）の大きさ、および、右：(c) 2時間半頃の最大ナダレの直前およびナダレ前後の変化図。



えられる。これを崩壊直前の「静穏化」現象と呼ぶことにすると、これはかなり前から始まっていて、判定は難しいが、特に崩壊が激しかった②の斜面については、30分以上前までさかのぼることができそうである。

この静穏化現象については、例えば図5に示した2つの例についても見られるのであり、130531-1ではもっとも激しく崩壊したセグメント②の直前、130814-2では同じく⑦の直前の変化は小さいように見える。ただしこれらは最も激しく崩壊したセグメントに見られるものであって、隣接しかつ連動したと思われるセグメントには必ずしも当てはまらない場合もある。

4. 考察と今後の課題

4.1 連動を起こす正多角形

これまでの報告はすべて受け皿として正八角形のものを用いて行ったものだが、一部正六角形のものを用いて実験を行ったのでこの結果について述べる(図8)。図8の内容は図6と同じであり、(a)は重量変化、(b)はナダレの大きさ、(c)は時空間分布図である。

これから分かるように、2, 3の例を除いてほとんどのナダレは1つのセグメントで発生していて、隣のセグメントと連動はしていないように思われる。これは、多角形の角の数が減少するほど、各セグメントの独立性が強くなり、1つのセグメントで崩壊が起こっても隣接するセグメントはその影響を受けにくくなるためと思われる。幾何学的にこれを描くと図9のようになる。これは正多角形の1つのセグメントである斜面ABCのまわりの幾何を表したもので、Oは底面の中心、 h は頂点の高さ、 r はOとBCの中点Mを結ぶ距離、 R はOとBまたはCを結ぶ距離である。この中で

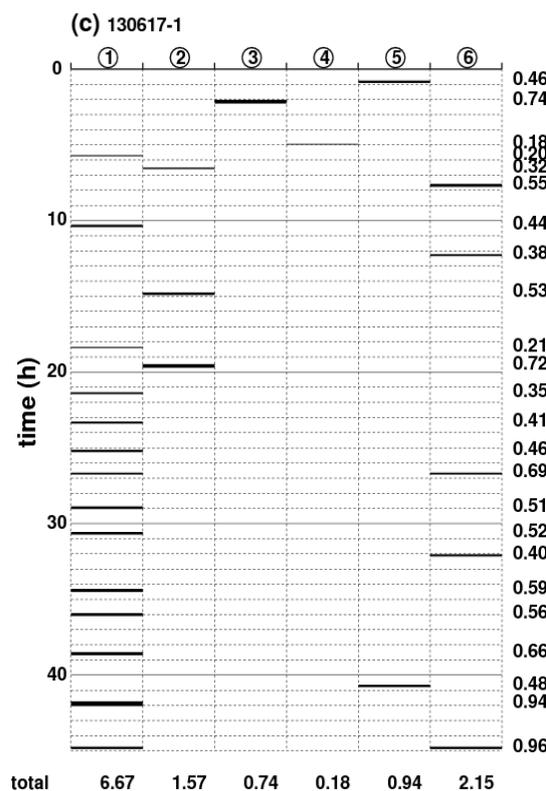
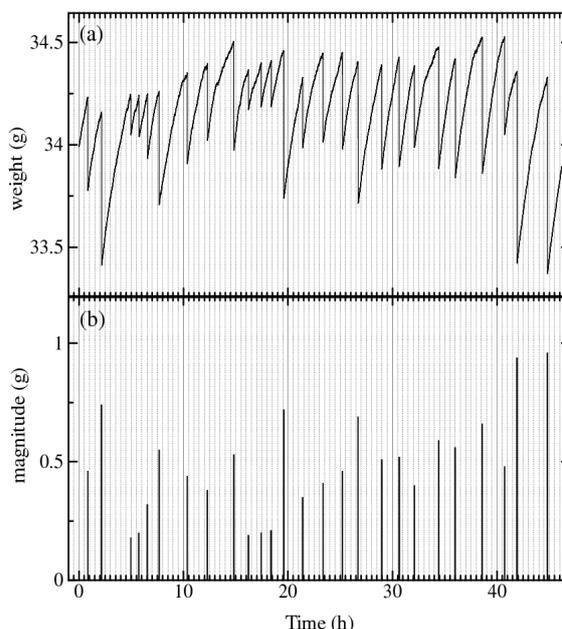


図8 六角形の受け皿を用いて行った実験(実験名 130617-1)における、(a) 砂の重量変化、(b) ナダレ(大崩壊)の大きさ、および (c) 崩壊の時空間分布図。

最も急な斜面はAMであるので、これを砂山斜面の安息角（実測値） 42° とした場合の、 r 、 R 、 h 、 θ を計算すると、表1のようになる。すなわち、多角形の角の数が減ると、稜線ABの長さが長くなり、角度 θ の値が小さくなって、バリアー（滑りにくくなり、連動が妨げられる）の働きをするためと考えられる。

表1 正多角形におけるパラメータの値（図9参照）

	r (cm)	R (cm)	h (cm)	θ (deg.)
正六角形	2.86	3.30	2.57	37.9
正八角形	2.92	3.16	2.63	39.7
円	3.00	3.00	2.70	42.0

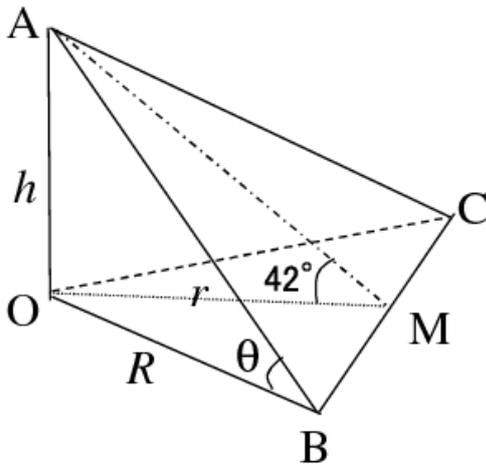


図9 正多角形の1セグメント。（本文参照）

4.2 崩壊の予測と静穏化

正八角形の場合は、複数の斜面が連動して大崩壊に至ることが多いことが判明した。砂の供給点（落下点）が受け皿の中心上にある場合には、各セグメントに比較的均等に砂粒子が配置され、臨界に達する斜面が多くなり、それだけ連動の条件が整うことになる。この意味で、3.1で述べたように、砂の落下点を極力受け皿の中心に位置させることは大変重要である。

しかしながらこのようにした場合、図4(b)、図6(a)に見られたように、得られる重量曲線には周期や崩壊の大きさの規則性が失われ、複雑さが増す。したがって、次にいつ崩壊が起きるかを予測することはかなり困難である。

しかしながら、この研究で判明したことの一つは、次回の大崩壊の中心となるセグメントは、大崩壊の直前には、一種の「静穏化」現象を伴うらしい、ということである。これはおそらく、臨界に達したために、新たに加わる応力は、未臨界の部分に供給されやすくなり、それがしばらく続くためではないかと考えられる。砂山の場合には、臨界に達していない斜面に粒子の供給が続くためではないかと思われる。

4.3 今後の課題

砂山の崩壊という単純な現象でも、その崩壊を予測することはなかなか難しい問題である。また連動はどのような条件が整った場合に発生するのかという、最も重要な問題についても、未解明の部分が多い。今後はより詳細に、大崩壊に至る過程の解明を進めたい。また、セグメントの形が異なる多角形（大きなセグメントと小さなセグメントが混在する多角形）についても、実験を行い、この問題の解明を一步でも進めてゆきたいと考えている。

謝辞

本研究所の藤井幸泰氏にはフリー画像処理ソフト ImageJ の存在と使用方法についてご教唆いただきました。感謝いたします。

参考文献

Ando, M. (1975a): Possibility of major earthquake in the Tokai district, Japan and its pre-seismotectonic

- effects, *Tectonophysics*, 25, 69-85.
- Ando, M. (1975b): Source mechanisms and tectonic significance of historical earthquakes along Nankai Trough, Japan, *Tectonophysics*, 27, 119-140.
- 有吉慶介・松澤暢・矢部康男・加藤尚之・日野亮太・長谷川昭・金田義行 (2011): 東北地方太平洋沖地震・スマトラ島沖地震における連動型地震の考察, *JAMSTEC Rep. Res. Dev.* 13, 17-33.
- 中央防災会議 (2013a): 南海トラフ巨大地震の被害想定について (第2次報告)
- 中央防災会議 (2013b): 南海トラフ巨大地震の被害想定について (最終報告)
- 石橋克彦 (1976): 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾地震について—, *地震学会講演予稿集*, no.2, 30-34.
- 石橋克彦・佐竹健治 (1998): 古地震研究によるプレート境界巨大地震の長期予測の問題点—日本付近のプレート沈み込み帯を中心として—, *地震II*, 50別冊, 1-21.
- Lay, T. and Kanamori, H. (1981): An asperity model of large earthquake sequences, in *Earthquake Prediction, an International Review*, Maurice Ewing Series, IV, American Geophysical Union, 579-592.
- Mogi, K. (1970): Recent horizontal deformation of the earth's crust and tectonic activity in Japan (1), *Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo*, 48, 413-430.
- Seno, T. (2003): Fractal asperities, invasion of barriers, and interplate earthquakes, *Earth Planets Space*, 55, 649-665.
- 瀬野徹三 (2012): 南海トラフ巨大地震—その破壊の様態とシリーズについての新たな考え—, *地震II*, 64, 97-116.
- 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.