砂山くずし実験結果の多様性

吉岡直人

深田地質研究所

Some varieties in results of sandpile experiments

YOSHIOKA Naoto

Fukada Geological Institute

要旨:地震現象の多様性に関連して、その背後に潜む物理にたいするヒントを得る目的をもって、 一連の砂山崩しの実験を行った.砂山崩しの実験では、同じ条件で実験を行っても完全な再現性 を得るのはほとんど不可能であり、もちろん統計的に見た場合の共通点はあるものの、得られる データの細部は毎回異なっている.本稿では、砂山崩しの実験装置と実験方法について詳しく紹 介し、むしろ実験結果の多様性に焦点を当て、実験手法の何が砂山の挙動を決めるのか、につい ての考察を加えた.この結果、たとえば砂の落下高さが、砂山の最大重量に影響を与えているこ とが明らかとなった.また、円形ではなく、正多角形の台を用いた実験も行い、いくつかの部分 が連動して大きなナダレになる現象も観察できた. キーワード:地震、砂山崩し実験、規模別頻度分布、連動性

Abstract: In order to obtain some hints for the underlying mechanism of varieties in earthquake occurrence, a series of sandpile experiments have been performed. In the experiments even if made under the same condition, it is almost impossible to expect the perfect reproducibility, that is to say, the results vary from experiment to experiment, although they have, of course, common features in a statistical sense. In this report, we first describe the apparatus and the experimental methods in detail and then focus rather on the varieties of the experimental results, considering what brings the varieties into the experimental results. Then we found, for example, that the height of drop point of sand affects the maximum weight of a sandpile. As a new trial, we also made sandpiles on regular polygons (not on circular disks) and observed consecutions of avalanches at multi-parts of slopes, resulting in a large avalanche.

Keywords: earthquake, sandpile experiment, magnitude-frequency distribution, consecution

1. はじめに

はじめに簡単に「砂山崩し実験」とは何かを 説明しておこう.一口に「砂山崩し実験」とい っても様々な種類のものがあるが(たとえば、 Jaeger et al., 1989)、本稿で言う「砂山崩し実験」 とは、円形や多角形の受け皿の上に静かに砂を 落として砂山を形成し、ナダレによって変化す る砂山の重量を連続的に測定する、というもの である.砂は雨のように受け皿上に一様に降ら せるのではなく、受け皿の中心付近の一点に落 下させる.

この「砂山崩し実験」が、筆者の研究の対象 である「地震」にどのように関係するのかにつ いては、すでに Yoshioka (2003)、Yoshioka and Sakaguchi (2008)、深田研ニュース 101 号 (吉岡、 2009a),同 103 号 (吉岡, 2009b),また材料学会 誌の解説記事(吉岡, 2012)などで紹介されて いるのでここでは触れない.また,これに関連 した,「光弾性物質を用いた砂山崩し実験」につ いては,Yoshioka and Sakaguchi (2008)や,昨年 の年報(吉岡, 2011),上記材料学会誌にも述べ られているので,興味のある読者はそれらを参 照していただきたい.

本稿では、実際に砂を使った「砂山崩し実験」 について、その装置の構築、特徴、またそれに よって得られたさまざまなデータを紹介したい. ここで紹介する実験で用いた砂の供給装置は、 筆者のオリジナル作品であり、試行錯誤の末に 作り上げたものである. 今後同様の、あるいは これを応用した類似の実験を行おうとする人の 参考になればと思い、やや詳しく紹介する.

また,これまでは主に円形の受け皿を用いて 実験を行ってきた.本報告の大部分はそのよう にして得られたデータである.しかし,最近, 円形以外の正多角形を用いた実験も始めている. これは後で述べるように,「連動性」に着目した 実験である.まだ十分なデータが得られている 訳ではないが,この結果についても触れておき たい.

砂山崩しの実験は、単純なようでなかなか奥 が深いものを含んでいる.同じ条件で実験を行 っても、全く同じ結果が得られることはまずあ り得ない.もちろん統計的に見た場合、ナダレ の規模別頻度分布などについて同じ結果は得ら れるが、個々の実験データ(砂山重量の時間変 化曲線など)は毎回異なっている.また、たと えばそれぞれの実験で得られる最大重量も毎回 異なる.

本報告では、むしろこの多様性に着目し、何 が実験結果の多様性を作り上げているのか、に ついて考えたい.

2. 実験装置と砂

2.1 旧・砂供給装置の構造と問題点

以前行った実験(Yoshioka,2003)で用いた実 験装置は、図1(a)に示すように、ホッパーから 自然落下する砂を、逆Y字型のチューブコネク ターで何回も分岐させ(これによって流量を小 さくする),最後に漏斗で減速して円錐形の砂山 を形成するという、原始的なものであった.た とえば7回分岐させると、流れ落ちた砂の1/128 だけが砂山形成に使われ、残りは両側のバケツ





図 1 実験装置.(a) 旧装置.ホッパーの砂を落下させ て分岐し,流量を小さくする.(b) 新装置.砂溜め(中 央の箱)に溜めた砂は,回転するロッドによって左の砂 山に供給される.詳細は本文参照.

に収容され、再びホッパーへと運ばれる、ということになる.このような構造のため、砂の供給速度は分岐数によってコントロールされ、また分岐点の微妙な傾きに左右されることになる.したがって砂の供給速度を一定に保つことは極めて困難で、10%程度の砂供給速度のふらつきは避けられなかった.

しかしながらこの原始的な装置で得られたデ ータは上記の誤差を考慮しても、砂山崩し実験 の本質的な部分をなお十分提供するものであり、 論文(Yoshioka, 2003)へと結実したのである. これは大変重要なことであって、この実験装置 で得られたデータでも、処理を適切に行いさえ すれば、統計的な本質は失われないことを意味 するものである.

2.2 新・砂供給装置の構造

上述の旧装置の問題点を踏まえ,新たな装置 では砂の流量を一定に保ち,またこれをコント ロールすることが出来るものを目指した.

最終的に出来上がった装置を図1(b)に示す.

基本的な構造は次のとおりである.砂は回転 する傾斜したパイプ(P)によって供給される. すなわち,砂溜め(B)の中で回転するパイプ に穴を開けておくと,そこから砂はパイプ内に 自動的に流入し,パイプ内を移動して先端から 落下する.

この時,パイプの先端部を図2に示すような 構造にしておくと,砂が目詰まりを起こすこと なく,安定した供給速度が得られることが経験 的に分かった.すなわち,先端部は数センチの 間(この場合5 cm),一定の内径(この場合3 mm)を持つ中空円筒にする.この部分で,砂 は円筒内で整列し,パイプの回転速度に応じた 速度で移動し,落下する.

内径が大きく、砂が詰まった右側の部分から

この円筒形への橋渡しをする部分は,段階的に 径を小さくする(テーパーをつける)必要があ る.急激に小さくするとその部分でアーチ構造 ができやすく,目詰まりを起こす.

図2の右側の砂がぎっしり詰まった部分では, 砂は見掛け上,パイプに固定されたように回転 しているが,先端の円筒形の部分では砂は円筒 の底部に整列し,下方へと移動する運動のみを 行う.パイプと共に回転することはない.上部 の砂が詰まった部分からは,先端から落下する のと同じだけの量の砂が先端の円筒部分に供給 される.すなわち,砂はパイプに固定されてい るのではなく,ゆっくりと移動している.

なお図1(b)の砂溜めの部分(B)には内箱が 設けられていて、回転するパイプの穴の部分に のみ、砂が供給されるような仕組みとなってい る.同図に示されている2本の縦方向の筒は、 砂を補給するためのものであり、これに砂を入 れておくと自然に回転するパイプに砂が移動す るようになっている.これにより、人手を介し てパイプの穴の部分に砂を補給する必要がなく、 無人で長時間の実験を続けることが可能となっ た.



図2回転するパイプ先端の構造.先端の5 cm の部分 は、直径が3mm(一定)の円筒形となっており、この 部分で粒子は一列に並び、先端から落下する.砂が詰 まった右側の部分からはテーパーをつけた部分を介 して先端部とつながっている.このような構造にして おくと砂の供給量はパイプの回転速度に応じて一定 に保たれる.

2.3 砂供給速度

砂を供給する速度は、回転するパイプの傾斜 角と、パイプの回転速度によって決まる.しか し、傾斜角を正確に変えるのは困難であるので、 傾斜角度は一定(10度)として、パイプの回転 数を変化させることにより砂の供給速度を制御 した.

図1(b)の右端にMで示したのが、回転を与え るパルスモータ(日本パルスモーター(㈱社製、 ステッピングモータ PFC55-48C1,ユニポーラ 12V仕様)であり、同図右下のMCで示したの がこれを制御するコントローラ(同社製、モー ションチェッカーMCH-5U-J)である.MC は1秒間に指定された回数のパルスを発生し、 そのパルス数に応じてMの回転速度が決まる.1 パルスで7.5度回転するので、48(=360/7.5)パル ス/秒(以後 ppsと表記する)で1回転/秒で ある.指定できるパルス数は1刻みで1~200 程度であり、これ以上早くするとパイプの軸受 けの摩擦のために、回転がスムースではなくな る.

図3にパイプの回転数(ppsで表記)と,各 回転数における1秒間に落下する砂の重量(g/s, 砂供給速度)を示す.この実験では砂がこぼれ 落ちない縁の付いた皿で砂を受け,その重量変 化を電子天秤(図1(b)のEB)により測定した. 後で示すように,実験では2種類の砂を用いた が(2.6で詳述する),ここでは粒径の大きい砂

(bsa)を用いて行った実験結果を示す.同じ回転速度でも粒径が異なると供給速度に違いがでる. 粒径が大きいほど,供給速度が大きい.これまでの経験では,大きい粒径の砂(bsa)の供給速度は,小さい粒径の砂(bsb)より2割程度大きい.

図3から,一定の回転速度では,一定の速度 で砂が供給され,またその速度は,パイプの回



図3 砂供給速度.回転数 (pps) と1 秒間に落下する砂 の重量 (g).砂は bsa 砂.

転速度に比例していることが分かる.

なお,砂供給速度に影響を与える可能性のあ る要因が,この装置を製作する過程でいくつか 考慮された.第一はパイプ内の砂の密度である. 砂のような粉粒体は振動を与えると圧密され, 密度が大きくなる.これが砂供給速度に影響を 与えるのではないかと考えられたので,パイプ 内の砂の密度を変えて何回か実験を行った.し かし,この密度変化は供給速度には全く影響を 与えないことが分かった.図2に示したような パイプ先端の構造では,先端部はパイプ内の密 度の影響を受けないためと思われる.

第二の要因は、パルスモータの振動である. パルスモータとパイプを直接接続すると、回転 軸中心のわずかなズレなどによって、モータの 振動がパイプに伝わり、これが供給速度に影響 を与え、場合によっては供給速度が一定ではな くなることが判明した.そこで、モータとパイ プを、ゴム製の継手(図1(b)のG)を介して接 続し、パイプに振動が伝わらないようにした. これによって、極めて安定した一定の供給速度 が得られるようになった.

2.4 データ取得システム

すでに述べたように、この実験では受け皿の 上に作られた砂山の重量の変化を連続的に測定 する.このために電子天秤(図1(b)のEB、ザ リトリウス社製 CP224S)を用いて 0.1 mg の精 度で、ディジタルデータを RS232C を介してコ ンピュータに取り込んだ.サンプリング間隔は、 0.2、0.5、1.0、2.0、2.5、5.0 および 8.0 Hz の中 から選択できるようにしたが、これまでの実験 では概ね 1 Hz を採用している.

図4はデータ採取プログラムのインターフェ イスのウインドウである.実験名,サンプリン グ間隔とグラフ部分の最少および最大表示重量, 時間幅を入力し測定を開始する.右上には現在 の重量の値(刻々変化する),これまでの最大重 量値,測定開始および終了時間が表示される. 下部には測定開始後の履歴がグラフとなって,

(指定した時間幅を超えると繰り返し)表示される.



図4 データ採取用プログラム.実験名,サンプリング 間隔(Hz)とグラフ部分の最少および最大表示重量(g), 時間幅(秒)を入力し測定を開始する.右上には現在値, これまでの最大重量値,測定開始および終了時間が表 示される.下部には測定開始後の履歴がグラフ表示さ れる.

2.5 XYステージとジャッキ

砂は受け皿のちょうど中心の真上から落とさ ないと、偏った円錐や角錐ができ、ナダレは常 に同じ方向に発生することになる.しかしなが ら実際問題として、ちょうど中心に落とすのは かなり困難である.また砂の出口が受け皿の中 心の真上にあったとしても、パイプ先端のわず かな揺れ、砂の大きさによる落下方向の変化な どによって、砂の落ちる場所には"ゆらぎ"が 生ずる.

しかし,むしろこの"ゆらぎ"によって,四 方に万遍なく落下することが望ましい.このた めには、「平均的」な落下点が受け皿の中心にあ ることが必要である.なるべくこの点に近付け るために、砂溜めの箱とパイプをXYステージ の上に乗せ、2 つの回転ハンドルによって水平 方向の位置を調整できるようにした(図5の中 間部).

またパイプの先端から砂山までの距離(高さ) を調節するために、ラボジャッキと呼ばれる小 型のジャッキをXYステージの下に置いた(図 5の下部). この2つの装置により、パイプの先



図 5 砂溜めの箱(上部)を載せたXYステージ(中間部)とラボジャッキ(下部).砂の落下点の水平位置と,落下開始点の高さはこれで調整する.

端の位置(砂の落下開始点)を3次元的にかな りの精度で調整できるようになった.なお,X Yステージの上面は,水準器によって常に水平 が保たれるように調整している.

2.6 砂

実験に用いた砂は、相模川河口近辺で採取した砂浜の砂である.これを水洗いして塩分をとり、自然乾燥させたのち、篩により2種類の実験用の砂を作成した.「bsa(bsはbeach sandの略)」は、1 mmメッシュの篩を通過しなかった砂、「bsb」は、0.5 mmメッシュの篩を通過しなかった砂、「bsb」は、0.5 mmメッシュの篩を通過しなかったものである.したがって、前者の大きさを,直径0.5-1.0 mm、後者の大きさを直径0.25-0.5 mmと表現する.図6にこれらの砂の写真を示す.

写真から明らかなように、「直径」という表現 を用いてはいるが、砂は球形からは程遠い、い びつな形をしている.しかしこれが粒子間の摩 擦を大きくし、安息角を大きくして美しい円錐 や角錐の砂山を形成するのである.たとえば粒 径のそろった球形のガラスビーズでは砂山は形 成されない.

では、球形という仮定はどの程度成り立つの であろうか? まず、約 350 個の粒子の重量か ら実測した粒子 1 個あたりの平均重さは、bsa は 0.591 mg、bsb は 0.076 mg であった.bsa の平 均直径は 0.75 mm であるから、これから求めた 球の体積 2.21×10^4 cm³ に密度 2.8 g/cm³ を掛け ると 0.618 mg となり、実測値 0.591 mg とほぼ 一致する.

bsb についても同様の計算を行うと, 0.077 mg となり, これも 0.076 mg という実測値とよい一 致を示す.

これらの結果から、少なくとも重さに関して





図6 実験で使用した砂.上: bsa 砂, 直径 0.5-1.0 mm. 下: bsb 砂, 直径 0.25-0.5 mm.

は、bsa は粒子1 個あたり 0.6 mg, bsb は 0.075 mg の球として扱っても大きな支障はないように思 われる.

ちなみに密度 2.8 g/cm³というのは、石英(2.7)、 長石類(2.6-2.8)、また有色鉱物である角閃石 (3.0)、輝石(3.2)などの密度に近い値である (理科年表による).砂の個々の粒子は、これら の鉱物で構成されていると思われるので、まず 妥当な値ではないかと考えられる.

すでに述べたように、砂のような粉粒体は、 震動などにより圧密を起こし、密度が大きくな る(以後「砂の密度」とは集合体としての砂の 密度を意味し、「砂粒子の密度」と区別する). そこで、25 cm³の比重ビンにさまざまな方法で 砂を詰め、その重さを測定して密度を算出した.

我 ■ ₱00 面後 (単位 g/ 0m /). () ₱16 主际中。		
	bsa	bsb
А	1.458 (48%)	1.422 (49%)
В	1.513 (46%)	1.483 (47%)
С	1.635 (42%)	1.597 (43%)

表1 砂の密度(単位 g/cm³).()内は空隙率

その結果を表1に示す. Aは砂を軽く詰めたとき, Bは軽くたたいて少し圧密を起こさせたとき, Cは振動を与えて, これ以上圧密が起こらないと思われる状態にしたとき, である. 表中の()内の値は,砂粒子の密度を2.8 g/cm³とした時の空隙率である.

表1より明らかなように、bsaの方が常にbsb より密度が大きい.これは直感に反する結果で ある.すべての粒子が球形であれば、密度(あ るいは空隙率)は粒子の大きさには関係しない が、この砂の場合、粒子の小さい方が比較的球 に近い形をしていて、そのため、空隙率が小さ くなり、密度が大きくなるように思われるから である.(ちなみに、球の最密充填構造の空隙率 は、体心立法格子の場合32%、面心立方格子の 場合、26%である.)この直観に反する結果の 原因は現在のところ、不明である.

3. 実験結果と考察

以上に示した実験装置と砂を用いて,砂山崩 し実験を行った.受け皿としては,円形のもの を基本とし,その直径が3 cm,4 cm,5 cm,6 cm, 7 cm,8 cmのものを用いて行った.また,直径 6 cmの円と同面積の,正三角形,正方形,正六 角形,正八角形を用いて実験を行った.

まず最初に、円形の受け皿を用いて行った実験結果を述べ、そのあとに、正多角形の受け皿 で行った実験結果を述べる.

3.1 ナダレの規模別頻度分布

図7にbsaで、円形受け皿を用いて行った実 験結果の例を示す.各図の左上の記号は実験名 であり、たとえば、bsa3_3_721は、bsaで行っ た3次元実験(2次元の実験も行ったので、こ れと区別するため、bsa3とした.2次元の実験 については本報告では触れない)で、_3_は受け 皿の直径3cmを表す.721はその系列の実験番 号である.図7には、受け皿の直径が3cmから、 8cmのものまで、すべて記されている.砂の供 給速度はいずれも10ppsであり、0.0017g/s(図 3参照)、すなわち、1秒間におよそ3個の砂粒 が供給される速度である.

これを見て明らかなように、受け皿の大きさ により、砂山の崩れ方に明らかな違いが生じて いる.受け皿が大きくなると、大きなナダレが 周期的に起きるようになることが明瞭に見てと れる.すなわち、受け皿の直径が3-5 cm の範



図7 bsa で円形受け皿を用いた実験の時系列例.各 グラフの上の名前の真中の文字が受け皿の直径(cm) を表す.

囲では全く周期性は見られず,6 cm になると, 大きなナダレがやや周期的に起きるようになり, 7 cm でかなり周期的なナダレが起きるように なる.8 cm では,ナダレの大きさも周期も揃っ たものとなる.

図8は、図7に示された時系列から求めた、 ナダレの規模別頻度分布である.受け皿の直径 が3-5 cmの範囲では、両対数グラフ上でほぼ 直線となり、地震におけるグーテンベルグ・リ ヒター則に従うが、受け皿の直径が7 cm を超え ると、大きなナダレが周期的に起き、同則から ずれるようになる.これを「固有地震的」と呼 ぶ (Schwartz and Coppersmith, 1984; Yoshioka, 2003).

同じことを bsb を用いた実験についてみてみ よう. 図9および図 10 にその結果を示す. 砂供 給速度はやはりすべて 10 pps であるが, bsa よ り供給速度が遅く, 0.0014 g/s であるので, 1粒 子の重さ 0.075 mg を考慮すると, 1 秒間に約 20 個程度の砂が供給されたことになる.

bsb は粒径が bsa の半分なので,受け皿の大き さが 4 cm 程度ですでに周期的になることが期



図8図7に示されたデータから求めた,ナダレの規 模別頻度分布.

待されるが,実際には4cm でやや周期性はみら れるが,5cm ではっきりと大きなナダレが起き るようになる.



図 9 bsb で円形受け皿を用いた実験の時系列例. 各 グラフの上の名前の真ん中の文字が受け皿の直径 (cm)を表す.



図 10 図 9 に示されたデータから求めた, ナダレの規模別頻度分布.

なお、図8および図10の規模別頻度分布の図で、 小さいナダレの部分が直線からずれ、数が少な いように見えるのは、滑り始めたナダレが斜面 上で一旦止まるケースも数多く発生しており、 これは全体の重量には反映されないので、カウ ントされないためと考えられる.

2 種類の砂で微妙に受け皿と砂の直径の比が 変化するが、大局的には同じ傾向を示すと考え てよいであろう.この結果は Yoshioka (2003) や、 Held et al. (1990), Rosendahl et al. (1993, 1994) の 報告と調和的である.

3.2 実験結果の多様性

これまでの部分では、統計的に見た場合に、 同じ条件で採られたデータはほぼ同じ結果を与 えることを見てきた.

以下では、同じ条件下で実験を行っても、異 なる結果を与える事象に着目し、その原因につ いて考察したい.

3.2.1 時系列データの多様性

新たな例を挙げるまでもなく,すでに図7や 図9で見たように小さい径の受け皿で実験を行 った場合(たとえば図7のbsa3_3_721,bsa3 _4_722c,図9のbsb3_721など),ナダレの起き 方は全く予測不可能である.まったく同じよう に砂を供給しても,かなり持ちこたえて重くな ることもあれば,早い段階で崩れてしまう場合 もある.

このように、個々の事象はまったくの偶然に 支配されているように見えながら、統計的には 一定の法則性を見せる(この場合は、規模別頻 度分布がべき乗則にしたがう)のは、この現象 の本質であって、Bak et al. (1987)の言う自己組 織化臨界現象の典型例であると思われる.

逆に言うと、実験の細かな手順ややり方の違

いが時系列データの多様性をもたらしているの ではなく、これがことの本質である、と見るべ きであろう.

これに対して、大きい受け皿での実験では(た とえば図9の右下, bsb3 8 722), ほぼ同規模の ナダレがかなり周期性をもって起きている. こ れは全くの偶然に支配されているというよりは, 系が保持しうる最大の極限までもちこたえて、 これを超えたときに大きなナダレを生じて応力 を解放するということが繰り返されているよう に思われる. この現象が、とくに海溝の沈み込 み帯で起きる周期性の地震になぞらえて「固有 地震型 (characteristic earthquake type) 」 (Yoshioka, 2003) と呼ばれてきた所以である. ただしこの 場合でも、細かく見ると、最大値や、1回のナ ダレの大きさには"ゆらぎ"が存在する. これ に関しては統計がとれるほどの実験データは採 れていないし、本質的なものか、実験上のなん らかの影響を受けたものか、明らかとなってい ない. 今後の課題というべきであろう.

3.2.2 最大重量の多様性

円形の受け皿の上に作った円錐は,円錐の頂 点が円の中心上にあり,安息角が同じであれば 円錐の形は毎回合同となって,最大重量は同じ となるはずである.しかし実際には毎回最大値 は異なったものとなる.

最大重量に影響を与える可能性のある要因と して,①実験時の湿度,②受け皿表面の摩擦, ③砂供給速度,④円錐頂点(砂の落下点)の平 面位置,⑤砂の落下点の高さ,を考えた.

これらの影響を見るために,直径6cmの円形 の受け皿を用いてbsbで実験を行った.図11に 典型的な測定例を示す.これは90ppsで砂を供 給した時のものであるが,砂供給速度に因らず, 最大値は最初のピークに現れることが多い.そ の後、ピークの値は減少しながら大きなナダレ の繰り返しが続く.これは最初のナダレで表面 付近の構造が弱くなり、以後ナダレが起きやす くなるためではないかと思われるが詳細なメカ ニズムは不明である.

①実験時の湿度

図 12 に実験時の湿度と、その実験で得られた 最大重量値の関係を示す.湿度はコントロール したものではなく、実験開始時に室内湿度を測







定したもので、実験中に変化があった可能性は あるが、この値を持ってその実験の湿度とする. これをみると、湿度の高い方が最大重量が大き くなる傾向はあるが、バラつきは大きく、相関 係数 r は 0.46 である. この値自身は弱い相関 があることを示すものであるが、データには砂 供給速度や他の異なる条件が含まれており、そ の点も考慮する必要がある.

②受け皿表面の摩擦

従来,受け皿としては厚さ2mmのアクリル 製の円盤を用いてきた.これは表面が滑らかで, 砂との摩擦は小さいと考えられる.そこで表面 に砂 (bsb)を薄く貼ったものや,紙やすりなど で表面をやや粗くしたものを用いて実験を行っ た.しかし,結果に明瞭な変化は見られなかっ た.一旦砂山が形成されると,受け皿の表面摩 擦は砂山の形成過程にほとんど影響を与えない と思われる.

③砂供給速度

砂供給速度を速くすると、複数の砂が同時に 排出され、その相互作用のために、砂山の形成 に影響を与える可能性が考えられる.そこで砂 供給速度をさまざまに変えて最大重量を測定す る実験を行った.使用した砂は bsb、受け皿の 直径は6 cm である.この結果を図 13 に示す. 横軸には砂供給速度をパイプの回転速度

(rotation velocity, pps)で示す. 縦軸が1つの実 験で得られた最大重量(g)である.

この結果を見ると、同じ供給速度でも、最大 重量はかなりばらつくことがわかる(×印と〇 印の違いについては⑤で述べる).全体として砂 供給速度の、最大重量に与える一般的な傾向は 明瞭ではない.



④円錐頂点(砂の落下点)の平面位置

砂が落下する点が受け皿の中心にない場合は 円錐がいびつな形となり,最大重量が小さくな ることは明らかである.このため,すべての実 験において,落下点が受け皿の中心になるよう 調整した.具体的には,砂山の形成段階で(す なわち大きなナダレが発生する前の段階で),受 け皿からわずかにこぼれ落ちる砂が,受け皿の 周りに均等に分布するようにXYステージを調 整することにより行った.

⑤砂の落下点の高さ

図 13 において、×印で示したものは、砂山 の成長に合わせて、パイプ先端の落下点の位置 を砂山の頂点近くに合わせ、少しずつ上昇させ ながら行ったもので、砂の落下距離は数ミリ程 度である.これに対し、〇印で示したものは、 砂山形成の段階で、砂山の頂点から 20 mm 程度 の高さから落下させたものである.この図から 明瞭に分かることは、砂山形成の段階で 20 mm 程度の高さから落下させた場合の方が、そうで ない場合に比べて有意に最大重量が大きい、と いうことである.

この原因として次のことが考えられる.たと

えば砂山の直上2 mm の高さから落下した場合, 沿直方向の初速度を0として,砂が砂山に衝突 する速度 v は約 20 cm/s となる. これに対して 20 mm の高さから落下した場合は約 v=63 cm/s となり,3 倍以上大きい. 砂は衝突後,直ちに 静止するとすると,運動量変化 mv は力積 $f \cdot \Delta$ t (Δt は衝突時間)に等しく,このとき発生す る微小震動により,砂山には常時圧密が起き, 密度が高くなるためではないかと考えられる.

なお, bsb の安息角は写真撮影により 41-42 度と見積もられた. これをもとに円錐の体積を 算出し,砂粒子の密度を 2.8 g/cm³ と仮定して最 大重量が 37 g の場合の空隙率を計算すると, 46-48%となり,表1に示したB, すなわち,軽 くたたいて締め固めた場合に相当することが分 かる.最大重量が 36 g の場合は空隙率が 48-50%となり,砂を軽く詰めた場合に相当する (図 13 参照).

これらのことから,最大重量は砂山の圧密の 度合いに関係し,落下点の高さ,衝突時の衝撃 に関係していると考えられる.

3.3 正多角形の受け皿による実験

これまでの実験では、受け皿はすべて円形の ものを用いてきたが、正多角形の受け皿を用い た実験を行った.この実験の目的は、正多角形 の受け皿を用いることにより、斜面がいくつか の部分に区分(セグメント化)され、それらが どのように関係するか、を見ることである.一 つの斜面の崩壊が隣り合うセグメントに影響を 与え、結果的に複数の斜面が一斉に崩壊すると すれば、これは地震で言うところの、複数のセ グメントの「連動」に結びつき、これに関する 何らかの知見が得られるかもしれないと考えた からである.

6 cm の直径の円と同じ面積をもつ正三角形,

正方形, 正六角形, 正八角形の受け皿を用意し, 実験を行った. 底面積が同じなので, その上に できる角錐の体積は同じである(底面積×高さ /3)と考えるのは早計で, 安息角という制限が あるので, 辺の数が少ないほど高さが低くなる ので体積は小さくなる. たとえば図 14 には正三 角形の受け皿の上に作られた正三角錐を上から 見た図を示すが, この場合, 斜面 AOC の傾き は, 斜辺 OH の傾きが安息角になることで規定 され, 高さは円錐の場合のおよそ 78 %となる. 同様に正方形は 89 %, 正六角形は 95 %, 正八 角形は 97 %となる. 実際問題としては, 三角形 の場合, 中心 O の上に砂を落としても, 三角形 の頂点 A, B, C の付近にはなかなか砂が供給 されず, 全体の重量は 77 %には届かない.

図 15 に正三角形の受け皿で観測された重量 変化曲線を示す.比較のために、円錐の場合の 量変化曲線を点線で、その目盛を右軸に示す. どちらも砂はbsb、砂供給速度は60 pps である.

正三角錐の場合は、円錐の場合に比べて、小 規模なナダレが頻発していることが分かる.最 大のナダレでも 0.5g以下である.実際、ナダレ は図 14 の OH など、斜面の中心付近の最も急な



図 14 正三角錐の上面図. 斜面AOCの傾きは, 斜辺 OHの傾きが安息角になることで規定される.

部分に集中して起きている.これは辺の数が少 ない受け皿ほど、1 つの斜面上での傾きの変化 が激しくなるためであると考えられる.



図 15 正三角形の受け皿による重量変化(実線, 左軸) と円錐の受け皿による重量変化(点線, 右軸)の比較. 砂は bsb, 砂供給速度は 60 pps.

このように角錐の場合は、ナダレの起きるセ グメントに分割され、セグメントの独立性があ る程度保たれるように思われる. 三角錐の場合 には、隣り合う面で互いに影響を及ぼしあうこ とはなく、3 つの斜面はそれぞれ個別に崩壊を 起こす. しかし、辺の数が増えてくるに従い、 隣接するセグメントの相互作用が増加すること が予想される.

これを確かめるために,図16に(a)正六角形, (b)正八角形,(c)円形の受け皿を用いた場合の重 量変化曲線を示す.砂は bsb,砂供給速度はい ずれも10 pps であり,図の縦軸と横軸のスケー ルは同じである.

これを見ると、(a)に示した正六角形の場合は、 0.5g程度の小さなナダレが起き、これが1セグ メントを単位としたナダレと思われるが、時々、 2つ、ないしは3つのセグメントが同時に破壊 したと思われる、大きなナダレが発生している. (b)の正八角形の場合は、小さなナダレと、1g 弱のナダレが混在しているが、3500秒付近の2g



図 16 (a) 正六角形, (b) 正八角形, (c) 円形の受け皿 を用いた場合の重量変化曲線. いずれも bsb, 10 pps. 縦軸, 横軸のスケールは同じ.

を超える大きなナダレは、4 つのセグメントが 同時に崩れたものである. すなわち、8 つのう ち半分のセグメントが崩壊したことになる.

(c)の円形の場合は、かなり大きさが揃ったナ ダレとなり、周期も長く、ほぼ一定間隔である. これは仕切りがなくセグメント化されていない ため、砂山全体の耐力を反映したものではない かと考えられる.

このように、円形ではなく、正多角形の受け 皿で実験を行うと、セグメントという概念が新 たに加わり、それらの相互作用も含めて、より 多様なナダレの発生様式が得られる.

4. おわりに

砂山崩し実験では、地震発生の多様性に類似 したさまざまなナダレ発生様式が得られる.し かしながら、この多様性の中には、ことの本質 に起因するものもある一方で、実験のやり方や、 実験条件に左右されるものもある.これを十分 わきまえた上でないと、実験結果を誤って解釈 することになりかねない.

今回の報告では、このことを念頭に置きなが ら、実験装置と実験方法についてかなり詳しく 説明を加え、さらにこれまでの経験から、実験 結果に影響を与えると思われる要因について注 意深くチェックを行った.

統計的に見た場合の,ナダレの規模別頻度分 布については,あらためてこれまでと同様の結 果が得られた.これはこの実験結果がことの本 質に根ざしたものであることを示している.

一方,同じ条件で実験を行っても,毎回異な る値を示すものの代表として,最大重量を取り 上げ,これを規定する要因を考察した.実験時 の湿度もややこれに関係していると思われるが, 最も重要な要因として,砂山形成時の振動によ る圧密過程が見出された.具体的には砂の落下 点の高さという,実験上の特殊な要因によるこ とが明らかとなった.このことは,粉粒体を扱 う実験では常に頭に入れておかねばならない条 件であろう.

さらに、今回は正多角形を受け皿とした実験 についても報告した.2011年の東北地方太平洋 沖地震は、それまで考えられてきたいくつかの 個別のセグメントが「連動」したと考えられる. また、南海トラフ沿いの地震についても、その 連動性が議論されている.砂山崩し実験でこれ を表現することは難しいが、正多角形の受け皿 を用いて実験することにより、ある程度セグメ ントという概念を持ち込むことができ、より複 雑な現象に一歩近づくことができたのではない かと思う.まだデータは少なく、十分ではない が、今後さらに実験を進めたいと考えている.

謝辞

本研究は科学研究費補助金,研究課題番号 21540442 (平成 21-23 年度)の援助を受けて行 われた.

参考文献

- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987): Selforganized criticality: An explanation of 1/f noise, Phys. Rev. Lett., 59, 381-384.
- Held, G. A., Solina, D. H., Keane, D. T., Haag, W. J., Horn, P. M., and Grinstein, G (1990): Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile, Phys. Rev. Lett., 65, 1120-1123.
- Jaeger, H. M., Liu, C.-h., and Nagel, S. R. (1989): Relaxation at the angle of repose, Phys. Rev. Lett., 62, 40-43.
- Rosendahl, J., Vekic, M., and Kelly, J. (1993): Persistent self-organization of sandpiles, Phys. Rev. E, 47, 1401-1404.
- Rosendahl, J., Vekic, M., and Rutledge, J. E. (1994): Predictability of large avalanches on a sandpiles, Phys. Rev. Lett., 73, 537-540.
- Schwartz, D. P., and Coppersmith, K. J. (1984): Fault behavior and characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas fault zones, J. Geophys. Res., 89, 5681-5698.
- 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 一,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 一, 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―,深田地質研究所年報, 12,95-104.
- 吉岡直人 (2012): 砂山崩し実験から地震予測法 を探る試み,材料, 61,8,675-679.
- Yoshioka, N., and Sakaguchi, H. (2008): Looking into a sandpile by photo-elasticity and discrete element method, in Advances in Geosciences, 13, Solid Earth (ed. K. Satake), World Scientific, 281-290.