

砂の性質を使ったおもちゃ

いしはま さえこ
石浜 佐栄子（学芸員）

突然ですが、砂は気体でしょうか、液体でしょうか、それとも固体でしょうか？ 答えはもちろん、固体ですよね。でも砂は、単体だと「ただの固体の粒^{つぶ}」なのに、集まって団体戦になると動いたり姿を変えたり、さまざまな面白い性質を発揮しはじめます。神奈川県立生命の星・地球博物館では砂を集めています、「砂を持って来てください」というと「一粒ですか？ それとも二粒？」という方はなくて、「何グラムですか？」「ペットボトルに半分くらい？」などと言われるのは、やはり「砂」=ある程度の量が集まった集合体だと認識している方が多いのだと思います。

粒の集合体としての「砂」の性質を利用すると、色々な面白いおもちゃを作ることができます。例えば、砂時計。常温常圧で固体のままなのに、少しずつ流れて時を教えてください。今回は、砂の性質と、それを生かして考えたいいくつかのおもちゃについて紹介します。

斜面をつくる

子どもの頃、砂場や海岸などで砂山を作ったことがあるという方は多いと思います。いったん水を加えて砂の塊にすれば、それを削って自在な形を作ることができますが、乾燥した砂を使うと、いくら積み上げても必ず斜めに転がり落ちてきます。こ

の砂粒が転がり落ちていく斜面、砂粒が山をつくる斜面の角度（勾配^{こうはい}）は、常に一定です。実際には粒の形や大きさ、粒の大きさの混ざり具合などによって多少変わりますが、おおまかには30度くらいで、公園の砂場で作る砂山でも、ダンブカーの荷台から流れ出す大量の土砂が作る山でも、だいたい同じ角度です。この山の斜面と水平面がなす角度のことを、安息角^{あんそくかく}（摩擦角^{まさつかく}）と呼びます。

この砂山の性質をもとに、以前「玉砂舞楼^{たまさぶろう}」というおもちゃを考案し、紹介しました（自然科学のとびら第15巻2号、p.10-11）（図1）。穴を開けた紙に砂をかけて浮き上がる模様を楽しむおもちゃで、トイカプセルに閉じ込めることで何度も繰り返し遊べるようにしました。今回は、部屋がたくさん分かれた透明な小物ケースに砂を入れて封じ込め、砂の山がつくる角度が一定であることを直感的に理解してもらうおもちゃを考えました（図2）。同じ砂であれば、何回傾けても、どのような向きに傾けても、必ず全ての部屋の砂の傾きが同じ（安息角）になります。中身の砂を変えると、砂ごとに少し角度の差があらわれます。名前は、安息角をもじって「あんそくん」。自由自在に動いているように見える砂も、実は決められた法則に支配されていることが分かります。

分かれる

次は、大きさの違う二種類の砂を混ぜて、山をつくってみましょう。ある一点から、混ぜた砂を落としてみると…斜面を転がり落ちているうちに二種類の砂が分かれていきます。転がる間に、なぜか大きな粒が浮き上がってきて先端（山のふもと）へと集まり、縞模様をつくってしまうのです（図3）。

この現象は「ブラジルナッツ効果」を考えると、理解しやすいです。色々なナッツが混ざったミックスナッツを振ると、大きなブラジルナッツばかりが表面に浮き上がってきて分離してしまう（図4）ことから、このような名前が付けられています。皆さんも、ゴマと塩を容器の中に入れておいたらゴマばかりが上の方に集まっていたとか、ふりかけの中で大きな粒ばかりが表面に集まってしまった（図5）とか、日常生活の中でこの効果を体験しているのではないのでしょうか。色々な粒が集まると、自分たちで勝手に分かれてしまうことがあるのです。混ぜたいのに分離してしまう、というのは困りもので、特に工業製品の製作過程などでは大きな問題になるようです。

この原理を使ったおもちゃを、地学ボランティア金曜日グループの皆様の協力を得て製作しました。カードケースの中に大きさが違う二種類の砂を入れ、テープで封をしたものです（図6）。手でカードケースを持って

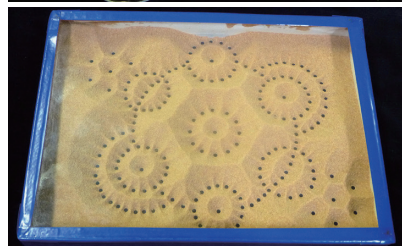


図1 上：トイカプセルに砂を閉じ込めた玉砂舞楼。下：ガラス板のついた標本箱に砂を閉じ込めた箱砂舞楼。安息角を生かした砂の模様が形成される様子を繰り返して楽しむことができる。

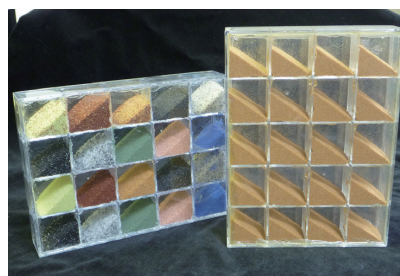


図2 安息角が一定であることを示すおもちゃ「あんそくん」。

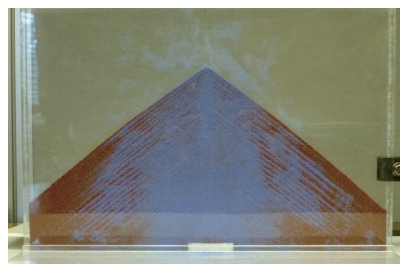


図3 より粗い赤い砂が、斜面先端（山のふもと）へと集まって縞模様をつくる。装置製作：松井理作氏（地学ボランティア）。



図4 ブラジルナッツ効果。上：振る前の様子。下：振った後の様子。青い点線で囲った大きなナッツが、ブラジルナッツ。

傾け、砂の動きが止まったら（安息角の斜面ができた）また少し傾け、とゆっくり動かしていくと、大きな粒が斜面のより先へと転がり、縞模様ができていきます。砂が流れて模様ができるという意味で「流れる砂絵 砂流絵紋」という名前を付け、博物館のイベント（2017年1月15日よろずスタジオ）で子どもたちにも作って遊んでもらいました。

ちなみに、いろいろな大きさの粒を混ぜて水の中に落としてみると、大きな粒から先に沈みます（図7）。砂流絵紋の場合は、大きな粒が表面に集まってくるので、大きな粒が小さな粒よりも上に来ることになります。沈んでできた（沈降による）砂の集合体の中では大きなものが下に、転がってできた（粒子流による）砂の集合体の中では大きなものが上にきてしまうのです。実際に砂がたまってできた地層の中でも、大きなものが下にいく級化層理（図8）と、大きなものが上にいく逆級化層理という二種類の構造が存在します。大きさごとに分かれる、という砂の性質は同じでも、分かれ方は条件によってさまざまようです。実は砂流絵紋でも、大きな粒の安息角と小さな粒の安息角の大小関係によって、縞模様にならずに分離してしまう場合もあることが、数値計算や実験で確かめられています（Makse *et al.*, 1997）。

動く

砂は、とても動きやすい物質です。石ころよりも小さくて軽く、泥のように固まっ

て動きにくくなってしまうということもありません。水の中でも、空気中でも、流れによって簡単に運ばれます。海岸などで砂が風で運ばれ、表面にできた波のような模様（風紋）が動いていく様子（図9上）、あるいは浅瀬の波に揺られて水面下の砂が左右に動いている様子（図9下）、見たことありませんか？ 水でも空気でも、砂は流れ（流体）に運ばれると、表面の形状（ベッドフォーム）を変えるのです。

動くのは、表面だけではありません。砂は地震などで大きく揺されると、その内部でも動くことがあります。揺れたらそのまま順序良く隙間を詰めていけばいいじゃないかなどと思ってしまうかもしれませんが、そう単純にはいきません。水を含んでゆるく詰まった砂の層の場合、揺られると砂同士のかみ合わせが外れて水に浮いたような状態になり、全体がまるで液体のように振る舞い始めます。液状化現象です。

砂とガラスビーズをペットボトルに入れて、液状化の実験装置を作ってみました（笠間・石浜・新井田, 2015）（図10）。水を入れたペットボトルを机の上に静かに置くと、粒の大きい砂が先に沈み、砂とガラスビーズの二層に分かれた地層ができます。ペットボトルに震動を与えてみると、下にあった砂が水を連れて表面に噴き出す様子（噴砂現象）が観察できます。地層中に隠れていたマッシュピンは浮き上がり、小さなガラス瓶は傾いて沈みます。実際の液状化現象では、埋められ

ていたマンホールのような軽いものは浮き上がり、地面は沈下して、電柱や建物が傾いたりします。このような現象も、砂の動きやすい性質によるものです。

大人になるとあまり注目しなくなってしまうけれど、実は結構面白い、砂粒の世界。たまには童心にかえて、砂のおもちゃで遊んでみませんか。

笠間友博・石浜佐栄子・新井田秀一（2015）
地学教育, 67: 157-170.
Makse, H. A., S. Havlin, P. R. King, & H. E. Stanley, (1997) *Nature*, 386: 379-382.

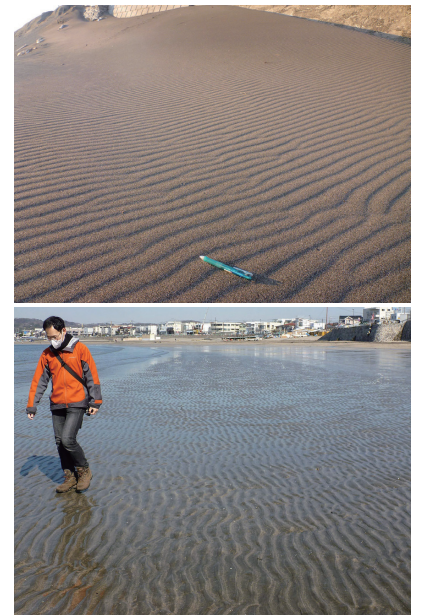


図9 上：風の流れてできた風紋（鎌倉市稲村ヶ崎）。下：水の流れ（波）でできたリップルマーク（鎌倉市材木座）。



図5 大きな乾燥エビが表面に集まったふりかけ（ふりかけ提供：新井田学芸員）。

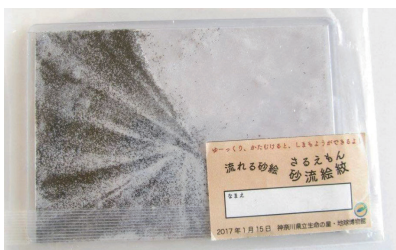


図6 「流れる砂絵 砂流絵紋」。安息角の斜面をつくりながらゆっくり傾け続けると、縞模様ができる。



図7 実験で作った級化層理。水の中では粗い粒から順に沈む。直径8 cmのアクリルチューブで実験。



図8 地層中に見られる級化層理（三浦層群三崎層，横須賀市長井）。



図10 液状化実験装置。上：実験前，下：実験後。青い砂が上へ噴き出し、マッシュピンは浮き上がり、小さなガラス瓶は倒れる。