

## 砂時計で学ぶみんなの科学

近藤 純正\*

### Q 蒸発速度と風速の関係は？

第1図は風洞内で測定された、ぬれた松の幹の重量の時間変化である。風速が1 m/sのときは丸印実線で示した。風速が3 m/sのときは、実線 (a) と破線 (b) のどちらの曲線にしたがって変化するか？

森林からの蒸発散の特徴を知るために、松の幹（長さ30 cm，直径=10 cm，松の断面は防水塗装）に十分水を含ませたのち，風速=1 m/sで重量変化を測定すると，第1図の丸印実線で示すようになった。

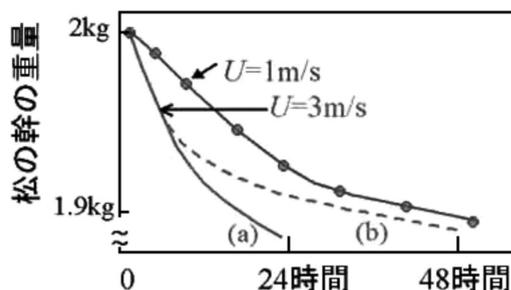
こんどは風速=3 m/sとし，同様な実験を行うと，数時間までの重量は直線的に減少し，その割合は風速1 m/sのとき約3倍になった。つまり，蒸発速度は風速に比例した。この実験から，森林の蒸発散と砂漠の蒸発に共通する過程があることに気づいた。

以下では，砂時計の中に見られる現象を説明し，最後に上記の問題の解答を述べることにする。

### 1. 80日間大砂時計の発案

1988年に仙台市民（代表：小野恒夫氏）から，「'89グリーンフェアせんだい」の会期80日間に合わせて80日間大砂時計を作り，「時間，環境，資源」などのテーマを話し合いながら「心の豊かさとは何か」を考えるシンボルにしたいという提案があった。

日常見かける砂時計の3分間計を20 cmの高さの石段一つにたとえるなら，80日間大砂時計は8,000 m級の世界最高峰に相当する。大砂時計は，これと似たところがあり，予想外のことが起こるかもしれない。だが，これに挑戦してみよう！



第1図 ぬれた樹木の乾燥過程の実験。

最初に8時間計から始まり，だんだん大きなものへと作っていった。砂時計の砂は，上側のガラス容器から小さなくぼみ「オリフィス」を通して下側のガラス容器に流れ落ちて行く。

### 2. 24時間砂時計で遊ぼう

この話は，すでに大学専門課程の3年生の気象学の講義でも，地球物理学者たち，流体工学者たち，あるいは気象学会シンポジウムでも行った内容である。

以下の2.1～2.7節は，(財) 升水記念市民図書館において小学4年生以上の父母同伴の授業「子どもも大人もいっしょに科学！」(2011年8月9日)で行った内容である。

#### 2.1 祈りで砂の流れが止まるか？

オリフィスから流れ落ちる砂は，数本の糸のようになって，下側のガラス容器にたまります。小さな砂の山はだんだんと高く，富士山ようになります。しばらくすると，オリフィスの砂の流れが遅くなりました。最初，平らであった上側のガラス容器の砂は，まん中に窪みができ始め，やがて窪みは富士山とちょうど正反対の形となり，蟻地獄のように，周りの砂を崩

\* Junsei KONDO, 東北大学名誉教授。

しながら大きくなっていきます。

オリフィス部に注目すると、小さな砂粒は上から整然とした集団になって集まり、オリフィス部が狭くなるにしたがって、砂の集団は速さを増し最大速度となり、オリフィスを通過します。砂時計がまるで生き物のように見えてきました。

さて、オリフィスの砂の流れを止められるか、だれか、「砂の流れ、止まれ！」と声をかけてみてください。止まってくれません。こんどは私が砂時計にそつと手の平を当て、心をこめてお願いしてみよう。

数秒後に砂の流れがピタッと止まった。私がガラス容器から手を離すと、砂は再び流れ始めました。

もう一度やってみても、同じように砂の流れが止まる。砂時計はまるで魔法のようです。手を当てる人によって、止まりかたが違います。

## 2.2 砂は崩れて安息角をつくる

下側のガラス容器にたまった砂を見ると、もう大きな山になりました。頂上が数分間ごとに険しくなると、崩れてすそ野に広がっていきます。山崩れです。1回ごとの山崩れは同じではありません。

山の斜面と水平面のなす角度は安息角と呼ばれています。粒子の大きさ、かどの丸み、含有水分などによって変わります。この砂時計の安息角は約35°です。

近くに斜面がある所に家を建てると、斜面の傾斜が安息角よりも大きいと崩れる心配があります。

## 2.3 オリフィスの大きさ

24時間砂時計の砂は、どのようにしてオリフィスを流れ落ちるのでしょうか？砂粒の直径は0.2 mm、オリフィスの穴の直径は1.6 mmです。穴の直径は砂粒の大きさの8倍ですから、オリフィスを完全に通り抜けることができます。

仮にオリフィスの直径が1 mmだとすると、穴は砂粒の5倍もあるので、砂は流れると思うかもしれませんが、砂はオリフィスですぐ詰まります。実験を繰り返しても、すぐ詰まります。

別のことを連想しました。人々がたくさん集まる大ホールの出入口は広く、人間の身体の幅の数倍以上はあります。もし、出入口の寸法が身体の幅の2～3倍しかなければ、非常時に人々が殺到すると、身動きができなくなります。砂時計が動くには、砂粒が集まるオリフィスの直径は砂粒の大きさの6倍以上でなければなりません（砂の形や含水率などに依存する）。

## 2.4 見えないものに気づく

先ほどの観察で砂の流れが止まった理由はなぜか、

皆さん気づきましたか？

砂時計はガラス容器に砂を入れたあと、砂がこぼれないように密封してあります。中の空気は約1気圧で、外の気圧と同じです。

砂の流れで下側のガラス容器に砂がたまってくると、砂の増えたぶんだけ空気のいる場所が狭くなり、気圧が高くなります。上側のガラス容器は砂が少なくなったぶんだけ気圧が低くなります。

この上下間の気圧差で下側のガラス容器から上側のガラス容器へ向かって空気が流れます。砂は下向き、空気は上向きに流れています。

オリフィスでは砂の流れは見えますが、空気の流れは見えません。空気は狭いオリフィスで風となって砂の落下に抵抗しているのです。手の平で下のガラス容器に触ると、体温で中の気圧が急に高くなり、上向きの風が一層強くなりました。この吹き上げる強風が砂の落下を止めたのです。

オリフィスを通り抜けた空気は、こんどは多くの砂の隙間を通して、上端まで行かねばなりません。砂の隙間は小さく、砂の中に小さな土粒子が混じっていると、隙間を塞ぎ空気の流れを止めます。もちろん、大粒子が混じっていてもオリフィスで詰まるので、砂時計を作るには砂の精製が重要となります。砂が乾燥しすぎの場合は、静電気が起こって砂粒が固まるし、湿り過ぎても固まって砂が流れなくなります。

## 2.5 ハプニング

砂が止まって、悔しかったことがあります。24時間砂時計に続いて1週間砂時計を作りました。1週間計に砂121 kgが入れられて公開実験を行ったことです。1989年4月7日、だんだん成功の時間が近づいてきました。砂時計を見守っていた小野恒夫さんと石峰修さんは午前10時38分、「あと3～4分で計測終了！」と周囲の人々に知らせました。テレビ取材のライトが一齐に照らし始め、緊張が高まってきました。

その瞬間、砂の落下が止まりました。残念！惜しい！あと2分半を残したままです。連続時間99.98%で、残りの0.02%で止まってしまったのです。突然の出来事に、石峰さんはオリフィス部をたたきました。しかし砂は止まったままでした。

プロジェクトチームは、オリフィス部を本体から取り外しました。オリフィスに残った砂を紙の上に落として空けてよく見ると、最小部の直径1.45 mmのオリフィスに、「通行止め」の道路標識のようなX字が作られているのではないか。繊維質の針のようなごみが

2本重なってX字を作っていたのです。

普通なら、細長い砂はオリフィスを通るとき、斜めになって落ちるのですが、偶然にもその瞬間水平になったのでしょうか。約70億個の砂粒の中に、悪さをしたごみが2個あったのです。70億は世界の人口に相当します。みんなが前を向いてオリフィスというトンネルを抜けるプロジェクトを行ったのに、それが終わる直前に、2人だけが横を向いたために、つまり転び、後ろに残った人々を止めてしまったのです。

## 2.6 砂時計の栓を開けると何が起る？

ここには24時間砂時計のほかに3時間砂時計があります。3時間砂時計は、ガラス容器の上端の細穴から砂を入れ、栓で密封してあります。もし、この3時間計の栓を開けると、上側のガラス容器の気圧と、皆さんがいるこの室内の気圧が同じになろうとする。

現在、上側のガラス容器の気圧は下側より低くなっており、オリフィスでは下から上向きに風が吹いています。上側の栓を開けると、どうなりますか？

子どもAの答え：

「栓を開けると、低くなっている上側のガラス容器の気圧が急に高くなるので、オリフィスの砂の流れは押されて速くなります。」

この考えに異論はないですか？それでは、栓を開けますので、オリフィスを見てくださいね。なんと不思議！オリフィスで一瞬、砂が渦巻き、そして砂の流れは止まり、開けようと緩めたゴムの栓がシュッと吹き飛んでしまい、私も驚きました。

実はね、この3時間計は今年のお正月にテストのため、お正月の空気を入れておいたのです。先ほどの現象はなぜ起きたのか。その理由は、この部屋の現在の空気よりも、お正月の空気が濃く（気圧が高く）、ガラス容器内の空気が上端から噴き出たわけです。

つまり、砂時計は過去を記憶している。仮に、たかさんの砂時計をつくり、いろいろな日に栓をしておく。何年、何か月も過ぎてから順番に栓を開けて、砂の流れが止まるか、遅くなるか、不変か、速くなるかによって過去の状況を知ることができるのです。

頭の中で考えてみましょう。この部屋は2階ですね。砂時計をビルの屋上へ持っていき、栓を開けると何が起こりますか？……。

別の実験をしてみよう。ここに20 mlの注射器があります。3時間砂時計の上下のガラス容器はそれぞれ3 l (3000 ml) です。注射器と砂時計の間をゴム管でつなぎました。注射器を引いて上側のガラス容器か

ら瞬間的に空気を抜いてみよう。3000 mlから20 ml、つまり1%より少ないわずかな空気を抜くと、上側のガラス容器の気圧がわずかに低くなるはずですね。

オリフィスをよく見ていてね！砂の流れは止まり、しばらくすると、また流れははじめました。こんどは注射器を逆に押し、上側のガラス容器の中の気圧を少し高くすると、下向きの砂の流れが猛烈な速さで噴射しました。

誰かが質問しました。

質問：砂時計の中が真空だったらどうなりますか？

回答は、(1) 空気が無くなるので止まる、(2) 砂の流れは変わらない、(3) 遅くなる、(4) 速くなる。同様の質問は専門家からもありました。正解は宿題にしておきたいので、皆さん考えておきましょう。

## 2.7 大気圧

ガラス容器の上下の気圧差を測ってみると1~2 hPa (水柱で10~20 mm) のはずですが、これを測る装置は水を入れたU字管を用いる簡単なものですが、きょうは、みんなで砂時計をつくる時間があるので実験しません。1 hPaは水柱でほぼ10 mmに相当し、重さでは1 cm<sup>2</sup>当たり1 g (1 m<sup>2</sup>当たり10 kg) です。

気圧が1000 hPaということを知ったことはありませんね。……聞いたことがない！……。それでは、今後テレビで天気予報を注意して聞くようにしましょうね。例えば、「950 hPaの強い台風が……」と説明されることがあります。

気圧とは、この面から上空にある空気の重さのことです。もともと気圧は水銀柱の高さで測られていて、1000 hPaは水銀柱750 mmの重さが押す力のことで、水銀の比重は13.6ですから、面積1 cm<sup>2</sup>当たりでは約1 kg (面積1 m<sup>2</sup>当たりでは10 t) の重さに相当します。1000 hPaは水柱では10 mの重さに相当します。

血圧、たとえば75~150ミリは聞いたことがありますね。これは水銀柱75~150 mmの圧力のことであり、普段の大気圧より10~20%大きい圧力で心臓からの血液が身体中に送り出されていることです。

## 2.8 照明で雲が発生

砂時計の上側のガラス容器につくられたすり鉢状の形状の時間変化を写真に撮っておこうと考え、照明ランプを照らしたままにしてありました。

しばらくして戻ってみると、上側のガラス容器の内壁に水滴の雲ができていたではありませんか。私はと

でも驚きました。照明ランプを消すと、ガラス容器の内壁にできていた雲は消えてしまいました。

これが砂漠の気象だと直感的に思いました。つまり砂漠では、日中太陽が昇り地面を照らすと地面温度は上昇し、砂の層に含まれていた水分が蒸発し、上空へ昇り雲となって浮かぶ。太陽が沈むと雲は消えて再び砂漠の地中へ還っているのだと。

空気は温度が高いほど水蒸気を多く含むのに対し、地中は逆で、温度が高いほど含むうる含水量は小さくなる。この互いに異なる性質によって、昼夜の水分の流れが地表と大気の間で起こっているのです。乾燥した砂漠では、日中は水分を大気に放出し砂の含水率が減少し、温度が下がる夜間は吸湿し、含水率が増加する (Kondo and Xu 1997)。

クッキーや魚の干物が乾いたり湿ったりするのも同じ現象です。

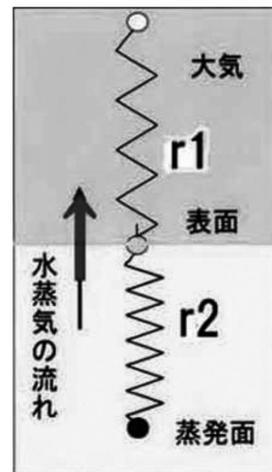
### 3. 森林の蒸発散

私は、砂漠における水の循環についての研究と同時に、それと正反対の湿潤気候の森林における水の循環の研究もしていた。第1図に示した風洞実験において、松の幹が十分に湿っている間は、蒸発速度は風速に比例したが、松の表皮付近が乾いてくると、蒸発速度は風速と無関係になった。その瞬間、この性質こそが、砂漠の蒸発現象だと考えついた。

実は、1986~87年の頃のこと、中国の乾燥域における水循環を明らかにする目的で、日本と中国の共同研究プロジェクトが起り、現地観測への参加の打診を受けたことがある。しかし、乾燥域では蒸発量は少なく、湿潤域で開発された従来の「蒸発量は風速に比例する」(水蒸気は風の鉛直成分で運ばれる)の原理に基づく方法では誤差が大きく観測できないことは明らかであり、プロジェクトには参加せず、砂漠に応用できる「裸地面蒸発モデル」の開発を目ざした。

### 4. 砂漠の蒸発と風速の関係

第1図の実験から、砂漠では蒸発量は風速と無関係になることに気づき、そのころ裸地面蒸発の数値モデル計算をしていた三枝信子さん(現・国立環境研究所)にこのことを伝え、再現できるかを試してもらっ



第2図 水蒸気の流れの抵抗表示。

た (Kondo *et al.* 1992)。

松の幹の乾燥実験でも、新しく開発した「裸地面蒸発モデル」でも、ある程度乾燥化が進んだ段階では、蒸発量は風速と無関係になる。乾燥化が進んだ段階とは、松の幹なら1日後、砂漠なら大雨で裸地面が十分湿ってから数十日後に相当する。

第2図を参照すると、蒸発速度は、水の蒸発面が表面にあるときは大気中の抵抗  $r_1$  (交換速度の逆数) つまり風速に依存するが、蒸発面が表面から深いところになる(乾燥が進んだ)ときは  $r_1 + r_2$  による。 $r_2$  は分子拡散を表す抵抗で非常に大きく、 $r_1 + r_2 \approx r_2$  となり、大気中の風速とほとんど無関係になる。

この性質は、昔から多くの人々が無意識であれ知っており、薄手のシャツ類の洗濯物は、風当たりの強いところで乾かすのに対し、厚手の衣類や濡れた靴などは、強い風に当てるのではなく、風通しのよいところで陰干しにして乾燥させている。

### 参考文献

- Kondo, J. and J. Xu, 1997: Seasonal variations in the heat and water balances for nonvegetated surfaces. *J. Appl. Meteor.*, 36, 1676-1695.  
 Kondo, J., N. Saigusa and T. Sato, 1992: A model and experimental study of evaporation from bare soil surfaces. *J. Appl. Meteor.*, 31, 304-312.