

感性でとらえる 地盤液状化の科学おもちゃ

エッキー

対象：幼児から専門家まで

いつでも
どこでも
なんどでも
遊び心があれば
どなたでも
楽しくまなぶ
こわい災害

防災科学技術研究所
Dr. ナダレンジャー

目 次

まえがき	1
エッキーについて	2
液状化の原理	5
エッキーの秘密	9
いろいろなエッキー	15
あとがき	18



3.11 東北地方太平洋沖地震
による、液状化のために浮き
上がったマンホール
(茨城県常陸太田市)

まえがき

本冊子は、Dr. ナダレンジャーのオリジナル科学おもちゃ「エッキー」の解説本です。エッキーは地震による地盤の液状化現象を、いつでも、どこでも、なんどでも、そしてほとんど、どなたでも 1 分以内に再現することができる実験道具です。身近な材料だけでできています。知識は必要ありません。感性だけご用意ください。



エッキーについて

● エッキーの作り方

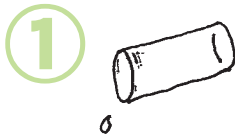
材料 1 人前： ・ 500ml の透明ペットボトル 1 本



マップピン

・ 0.2mm くらいの小粒で大きさのそろった砂 100ml
(たとえば豊浦硅砂)

・ 頭の直径が 10mm の市販のマップピン数個
・ 紙コップ 1 個



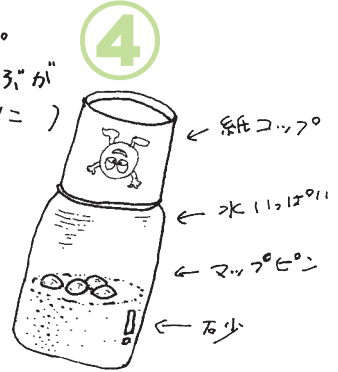
水が透明になるまで何度もすすぐ。



マップピンを入れる。



水をいっぱいにして
ふたをしめる。
(空気のつぶつぶが
入らないように)



できあがり!

- ① 500ml のペットボトルに砂 100ml を入れ、水を口いっぱいまで入れる。
はじめのうちは、水がにごるので、何度もすすいで水を交換する。
- ② 水がにごらなくなったらマップピンを数個入れる。
- ③ ボトルにあまり空気が残らないように、水をペットボトルいっぱいにしてふたをしめる。
- ④ 紙コップをボトルにかぶせてできあがり。



● エッキーの基本の遊び方



①はじめの状態。



②エッキーをすばやく逆さにし、砂が沈殿するまで振動を与えずにそっとしておく。



③砂が沈殿するとマップピンも砂の中に埋まって見えない。



④ここで、ボトルを指先でこつんと1回たたいてみると、沈んでいたマップピンが砂の表面に浮かんでくる。

①にもどり、再び、ボトルを逆さにすれば同じことが何度でもできる。

③で、はじめからピンが砂の表面に顔を出していたら失敗。④で、ボトルを1回たたきただけで埋まっていたピンがすべて浮上するように練習しよう。

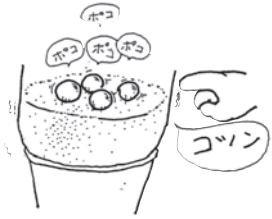


● これって何？

このような現象を液状化現象といいます。

地震の震動で実際に液状化現象が起こると、地中のマンホールが浮き上がってくることがあります。エッキーはこのような現象を再現しています。砂の表面に浮き上がってきたマップピンは、

水には浮いていません。液状化が起こると、水に浮かないくらい重いものでも地表に浮き上がってくるのです。



● エッキーの飼い方

はじめのうちは、遊んでいると水がにごります。にごったら砂が流れ出ないようにして、水だけを取りかえてください。しばらく使わないときも、2ヶ月に1度くらい水をかえてください。また、水を入れないで、しばらく湿ったまま放置するとマップピンがすぐに錆びてしまいますので、いつも水を入れておいてください。



キレとコクが科学手品の命です

今、裏わざ、科学手品が人気です。子供に人気の科学手品は、専門家にもうけます。ということは、専門家にうけないネタは、実は子供にもすぐに飽きられてしまいます。要するに子供だましということでしょうか。キレのある分かりやすさの向こうに、コクのある広大な奥行きあつての科学手品なのでしょう。ただし、専門家にうけるからといって、子供にうけるとは限りませんので注意が必要です。

【注意事項】

- (1) まちがって飲む危険があるので、幼児の手に触れないところに保管してください。
- (2) ボトルのふたは、内容物がこぼれないようにきつくしめてください。
- (3) ピンは先端がとがっていて、けがをする恐れがありますので、十分ご注意ください。



液状化の原理

● 砂のなかの自由スペースが液状化を生む

砂の入った容器をたたいたり、振動させたりすると、砂粒の間の余分なスペースがつまって、全体として砂の体積が小さくなることは、日常でも経験することです。振動などの外力によって結合が離れた砂粒はスペースをつぶしながら、わずかではありますが全体として重力のために落下しているのです。

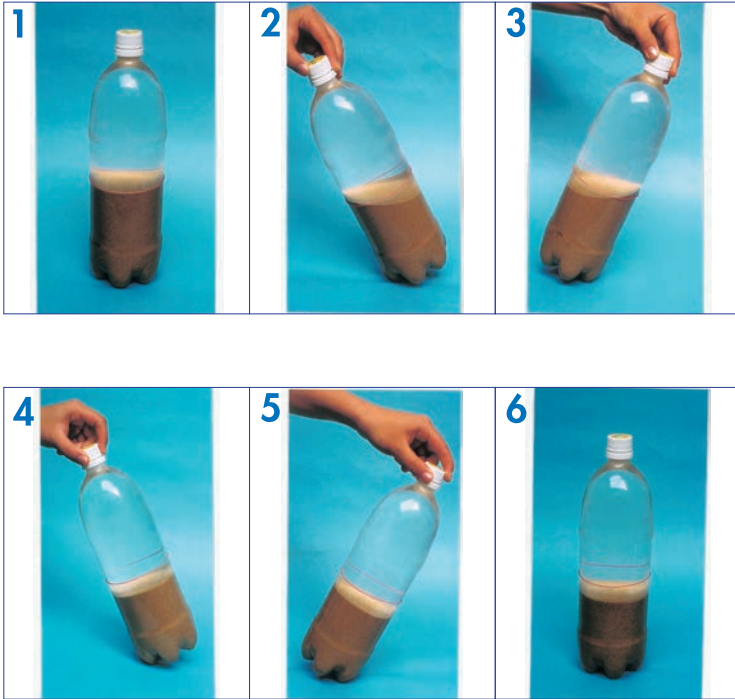
これは、空間がすべて水で満たされている場合と同じです。しかし、水の場合、粘性抵抗のため、着地するまでの間、砂粒は一瞬、水に浮遊した状態になります。このとき、砂は支持力を失って液体のようになります。それとともに、砂粒の重量は、砂粒同士が支え合う代わりに、水が支えることになるため、水は砂粒を支えている分だけ圧力が増加し、見かけ上、砂水が一体となって水よりも重たい液体に変身します。こうして、水には浮かないものでも、液状化によって砂水に浮くことになるのです。

● スペースをつくる、スペースをつぶす

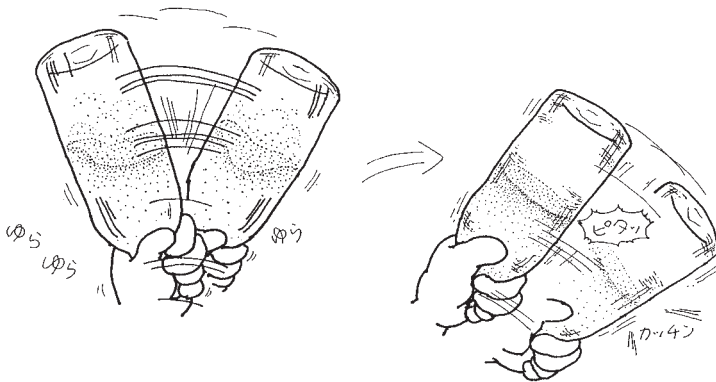
エッキーを逆さにするのは液状化が起こるように砂水の中に新たにスペースを作るための操作です。では、ピンを取り除いてリセットした状態で、エッキーを繰り返し左右に傾けてみましょう。はじめ、砂の表面がまるで液体の表面のように揺れます。これが液状化している状態です。しかし、しだいに揺れが小さくなり、やがて固まります。液状化はスペースが消失するまでの命だったのです。このとき、砂の表面ははじめと比べるとかなり沈下したのがわかります。液状化は結果として地盤の沈下をもたらします。

再び、逆さにしてリセットすることで緩く堆積した砂水層にスペースが生まれ、同じ実験ができます。この実験で液状化している時間は、砂の層が厚いほど砂粒の落下距離が長いと、また粒の大きさが細かい砂ほど落下速度が小さいため、長くなります。





- (1) リセットしたエッキーを繰り返し左右に傾ける。
- (2) (3) はじめのうちは砂の表面は液体のように揺れる。
- (4) (5) しばらくすると砂の表面はカチンと固まる。
- (6) 固まった砂の表面の位置が、実験前 (1) よりも沈下しているのが分かる。

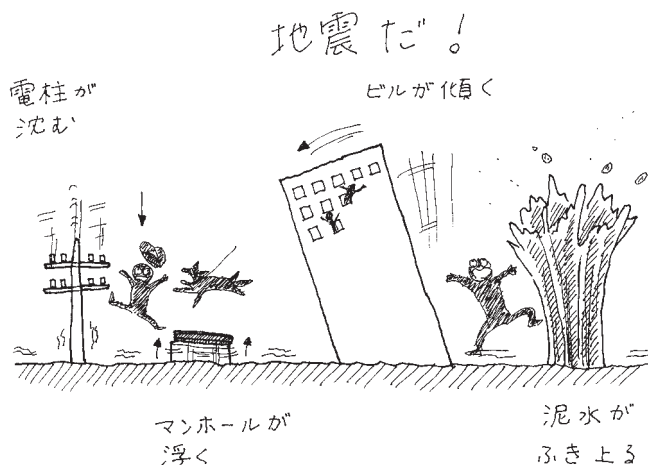


● 液状化で電柱が沈むわけ

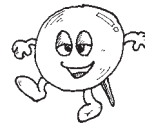
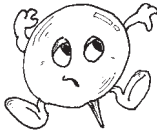
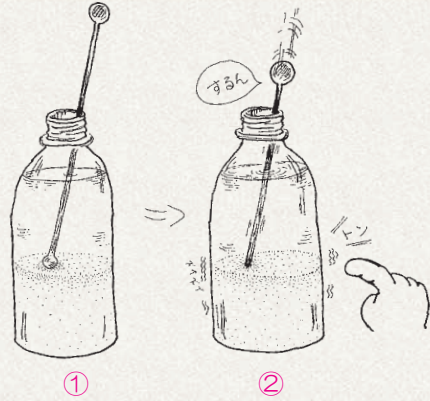
実際の液状化は、地下水に浸かった緩い砂地盤に強い地震動が作用することで発生します。地盤が液状化すると、砂の支持力は消失し、地中の物体に働く力は砂水による浮力と重力だけになります。これらの釣り合いの位置よりも深く埋まっていた物体は液状化によって浮き上がってきます。地中のマンホールが浮き上がったり、エッキーのピンが浮き上がってくるのはこのためです。

しかし、逆に、この釣り合いの位置よりも浅い場合は液状化によって物体は沈み込むことになります。リセットしたエッキーのふたを開け、例えばガラス製の棒を砂の表面付近に立ててみましょう。ここでエッキーを軽くたたいてみるとガラス棒は砂の中にめり込んでいきます。これは、ガラス棒を支えていた砂粒の支持力が液状化によって消失し、力の釣り合いがとれなくなったためです。液状化で電柱が地面に沈み込む現象はこれに対応しています。ガラス棒が沈まなくなったら、ふたをして水と砂を混ぜ合わせればリセットできるので何回でも実験ができます。

また、重心の高いビルは液状化で地盤の支持力が失われると傾いたり、倒れたりします。



- ① リセットしたエッキーのふたを開けガラス棒を砂の表面に立てる。
- ② その状態でボトルを軽くたたくとガラス棒の先端は液状化した砂の中に沈み込む。



スペースがつくるサッカーの液状化

サッカーの試合の解説で、プレーヤーが自由にプレーできる空間といった意味で、「スペース」という言葉がしばしば使われます。まるで、スペースをつくる、スペースをつぶすといったプレーが、サッカーのゲームそのもののような印象を与えることもあります。ボールを持った攻撃側にとって、自由に動ける空間はパス、ドリブル、シュートといった得点に結びつく大きな流れを生み出します。したがって、逆に防御側にとって、攻撃の流れをつぶすことは、スペースをつぶすことに他なりません。すなわち地盤の液状化現象と同様、スペースはサッカーの試合を液状化させているのです。



エッキーの秘密

● まず、はじめに

エッキーの実験で、マップピンが浮き上がってきたのは液状化現象であることが分かりました。では、エッキーを逆さにして砂を沈殿させると必ずマップピンが砂の中に埋まって実験準備完了するのはなぜでしょう。

実は、エッキーの秘密は、密閉した容器の中でふたを開けずにボトルを逆さにしたり、シェイクしたりして砂を緩く沈殿させるだけで必ず最初の状態にセットできる点にあるのです！つまり、浮き上がるエッキーは沈んだ状態に、沈ませるエッキーは突き出た状態に自動的にセットできるのです。

では、エッキーより小型のガラスビーズのニューエッキー（乳液ではない）を使って、自動リセットの原理を説明しましょう。

エッキーには主に3種類の状態があり、それぞれに対応した比重がある。

A＝水だけの状態の比重＝1

B＝沈殿した砂水の比重

C＝沈殿する前の容器内の砂と水が混合している状態の比重

Cは容器内の砂の分量によって決まる。

このとき、

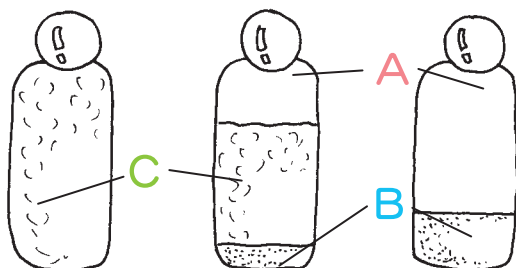
D＝マップピンの平均比重＝

$(\text{マップピンの重さ}) \div (\text{マップピンと同体積の水の重さ})$

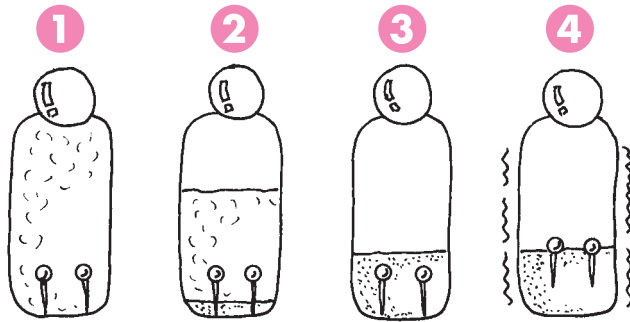
は、水Aより大きく、沈殿した砂水Bより小さくしなければならない。

$(A < D < B)$

これはマップピンが水より軽ければどんなにがんばっても水に浮いたままでセットできないからであり、マップピンが沈殿した砂水よりも重ければ液状化しても浮き上がらないからである。



● 液状化で浮き上がるエッキー



D が C より大きいとき

- ①② 容器をシェイクして置くとマップピンは砂よりも先に沈み、
- ③ 後から沈殿してくる砂に埋もれてしまう。
- ④ 容器に振動を与えると B よりも軽いから、液状化によってピンの頭部は沈殿層の表面に浮き上がる。
- ① にもどると同じことが再現される。

証拠写真

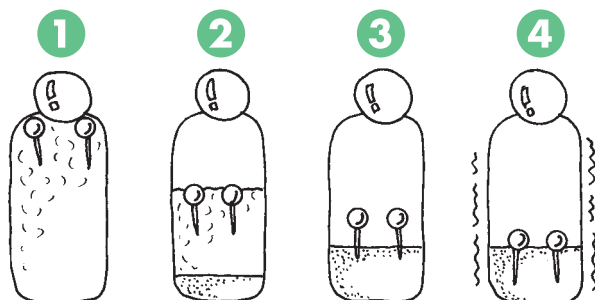


データファイル1

名 称	： 浮き上がるニューエッキー
マップピン	： 頭部径 5mm、平均比重 $D=1.33$
ボトル	： サイズ $62 \times 35 \times 23\text{mm}$
粉 体	： ガラスビーズ粒径 0.1mm、 沈殿時の砂水比重 $B=1.90$
砂の分量	： ボトル容量の 30%、 $C=1.27$



● 液状化で沈むエッキー



DがCより小さいとき

- ①② 容器をシェイクして置くとマップピンは沈殿中の砂水と水の境界に浮上し、境界の沈降とともに沈降する。
- ③ そしてすでに沈降している砂水層にピンの先端が着地したところで静止する。
- ④ ここで、容器に振動を与えると沈殿層の支持力が失われ、ピンは頭部を残して沈む。
- ① にもどると同じことが再現される。

証拠写真



※浮き上がるニューエッキーと沈むニューエッキーはマップピン以外は共通です。
それぞれのマップピンを一緒のボトルに入れると、浮き沈み合体エッキーの完成！

データファイル2

名 称	: 沈むニューエッキー
マップピン	: 頭部径 6mm、平均比重 $D=1.15$
ボトル	: サイズ $62 \times 35 \times 23\text{mm}$
粉 体	: ガラスビーズ粒径 0.1mm、 沈殿時の砂水比重 $B=1.90$
砂の分量	: ボトル容量の 30%、 $C=1.27$



● 液状化で倒れるエッキー

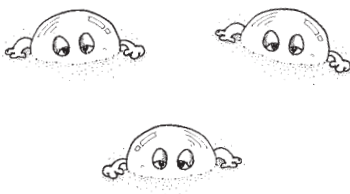
この実験では、1cm 足らずのピンを巨大なビルに見立てましょう。ピンの先端は容器底面につかえてこれ以上沈降しません。

しかし、液状化で支持力を失った砂では、重心が高くて不安定な状態にあるピンを支えることができず、ピンは傾き、倒れてしまいます。倒れるエッキーは浮き上がるニューエッキーとガラスビーズ以外は共通です。倒れるニューエッキーは沈殿砂水層の厚さが浮き上がるニューエッキーよりも小さいため、粒子を細かくすることで、液状化時間の短縮を補っています。



- ① よくシェイクしたニューエッキーを倒して置く。
- ② 砂が沈殿するとピンは針の先端が容器の底にほとんど着地した状態で立つ。
- ③ ボトルに振動を与えるとピンはぱたりと倒れる。

証拠写真



データファイル 3

名称	: 倒れるニューエッキー
マップピン	: 頭部径 5mm、平均比重 $D=1.33$
ボトル	: サイズ $62 \times 35 \times 23\text{mm}$
粉体	: ガラスビーズ粒径 0.06mm、 沈殿時の砂水比重 $B=1.81$
砂の分量	: ボトル容量の 30%、 $C=1.24$



● 実際の地盤の液状化

私たちが知っている実際の地盤液状化現象は、エッキーと同様、地下水で満たされた砂地盤で発生します。地震時には、地下水位より低い部分で液状化した砂が地表面に噴出し、火山の噴火口のように見える場合があります。エッキーで、地下水位より高い地上部分を含めてすべて水で満たしたのは、自動リセットにより、くり返し実験を可能にするためです。海底の地盤で起こる地震時の液状化はエッキーと同じ状況と考えて良いでしょう。

● おまけのワンポイント

水には浮かなくても塩水にすると卵が浮くことは子供の理科実験でよく知られています。これは塩水の方が水よりも重たくて浮力が大きくなるからです。では、砂水はどうでしょう。砂は水には溶けません。でも、よくシェイクした後の沈降している砂水層でも、まるで塩水のように浮力が大きくなるのはどうしてでしょう。砂が水の中を沈降するとき、ある程度沈降すると水の抵抗のため一定速度になります。このとき、水は砂の重量を支え、その結果、液状化のときと同様、沈降している砂が水と一体となって、見かけ上、重たい液体となり、大きな浮力が生ずるからなのです。

● おまけのもうワンポイント

子供向けの科学実験で、水がないときでも振動を与えると砂の中から何かが出てきたり、砂の中に埋まったりするものがあります。これはちょっと、液状化と似ているようですが、振動が本質的な役割をする現象で、ここでのいう液状化現象とはまったく違うものです。液状化現象では、振動はきっかけであり、スペースをつぶしながら砂粒が重力落下するときの水との相互作用が本質的な役割を担っています。だから、地震が終わっても液状化はすぐには終わりません。水を入れないエッキーと、水を入れたエッキーを比較してみてはいかがでしょうか。





液状化は日常語？

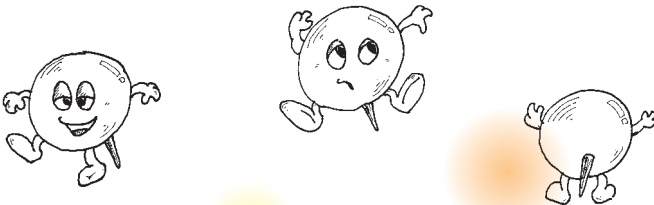
「液状化(えきじょうか)」という言葉は、本来は学術用語です。

しかし、日本では1964年6月16日の新潟地震をはじめ、釧路沖地震（1993年1月15日）、兵庫県南部地震（1995年1月17日）、鳥取県西部地震（2000年10月6日）、芸予地震（2001年3月24日）、十勝沖地震（2003年9月26日）、新潟県中越地震（2004年10月23日）、新潟県中越沖地震（2007年7月16日）、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日）、熊本地震（2016年4月）、北海道胆振東部地震（2018年9月6日）など大きな地震のたびに発生し、大きくマスコミ報道されるため、日本人でこの言葉を知らない大人はほとんどいません。

芸予地震の直後には、『自民やまぬ派閥「液状化」(2001年4月14日毎日新聞)』とか、『「液状化」社会に危機感 深刻化する人間関係不全(2001年6月20日毎日新聞)』のように喩えとして新聞紙上の見出しを飾ることもあります。さすがは地震列島人といったところでしょうか。

しかし、液状化の専門的な知識をもつ人をのぞけば、驚くことに、たとえ地震の研究者であっても液状化の科学についての基本的な理解はあいまいです。また、大学の専門課程の学生にとっては、液状化現象の本格的な講義は数式が多く難解で、感覚的な理解が困難なようです。

その一方で、最近の子供向けの科学イベントでは、振動によって固まっていた砂が液体のように融けたかと思うと、一瞬のうちにまた固まってしまう液状化現象のデモンストレーションは、人気のある出し物の一つといっていていいでしょう。ちょっとしたねじれ現象かもしれません。



いろいろなエッキー

●エッキー・ジョッキー・カッキー 3つあわせて「エキ・ジョウ・カ」!



①マップピンの代わりに
にさいこを入れた
「ジョッキー」!



②花の形のピンを入れ
た「カッキー」!



③テントウムシの形
のピンを入れた「テン
キー」?

●エッキー・エッキー

弁当の醤油を入れるタレピン。
これに砂を入れて水で満たせば、
小さなエッキー。これをマップピ
ンの代わりに大きなエッキーに入
れる。タレピンに入れる砂の量で、
比重を調整すれば、浮き沈み傾き
自由のエッキー・エッキーの完成。

●世界最小ニューエッキー

市販品だけでつくった世界最小
のニューエッキー。高さ25mm、
直径13mmのガラス容器に
0.06mm ガラスビーズ使用。沈む
ニューエッキー、浮き上がるニュー
エッキー、沈んで浮き上がるニュー
エッキーなどがある。



●スーパーボールエッキー

500ml のペットボトルを使った沈むエッキー。マップピンの代わりに直径 15mm のスーパーボールに 55mm のピンを刺して使用。砂は 200ml。1500ml ペットボトルを使えばさらに良い。エッキー・エッキーのタレピンを入れて浮き沈み同時エッキーも可。



エッキーは震動自記録計

エッキーの実験では、ボトルを手でたたくなど人為的な刺激を与えることによって液状化を起こしますが、実際の地震が起きたときでも、その震動がある程度以上であればエッキーの中で液状化現象による反応が起こります。そこで、しばらく家を留守にすると、エッキーをセットしておけば、帰宅してエッキーが反応しているかどうかで、留守中に地震があったかどうかわかることになります。もちろん、空き巣ねらいの泥棒が触れても反応するので、地震動だけを感知するとは限りませんので、使用上の注意が必要です。ただし、エッキーの反応を見なくても液状化が起こるくらいの地震なら家の中は目茶苦茶？になっているかもしれませんが・・・。



●その他のニューエッキー

化粧品の小瓶、洋酒のミニボトルなどどんな容器でもオリジナルエッキーが作れる。



●いろいろな砂でオリジナル

ご当地エッキー

500mlのペットボトルにいろいろな所の砂を使ったエッキーを作ろう。

砂粒の大きさにより、反応が若干異なる。お台場海浜公園エッキー、南極エッキー、大洗エッキー、中禅寺湖エッキーなど。



エッキーの自由研究

お陰様で、防災科研ニュースでエッキーを初めて紹介して以来、多くの反響をいただいています。この中で特に多い質問として、「自分でもエッキーを作りたいのだが、砂はふつうの砂浜の砂や、砂場の砂でもいいのか」というものです。実際、『地盤液状化現象の科学手品「エッキー」(1)』で紹介した「エッキーの素」として使っている砂は、豊浦硅砂と呼ばれるかなり粒子の大きさのそろった細かい試験用の砂です。また、ニューエッキーではボトルの大きさに合わせて粒径約0.1mm および約0.06mmの2種類のガラスビーズを用いています。これらは、誰でもすぐに手に入るものではありません。そこで、500mlペットボトル用のエッキーに砂浜の砂を使って、エッキーと同じやり方で、うまくピンが浮いてくるか試してみました。その結果、極端に大粒の砂以外、ほぼ、成功しました。ただし、粒子が粗くなるにつれて、ボトルを逆さにしたときの砂の沈降速度は速くなり、液状化させたときのピンが浮き上がる反応もすばやくなります。また、海や川の砂のようにいつも水に洗われている砂の方が、砂場や工場現場の砂より水がにごらないのでエッキーに向いています。いずれにせよ、砂浜の砂、飲み終わったペットボトル、100円ショップで買ったピンを使えば、しめて10円かからずにエッキーは完成です！



あとがき

いかがですか？エッキーを体験したくなりましたか？エッキーのアイデアが生まれたのは 1997 年茨城県つくば市です。それから、約 20 年。エッキーが生まれたつくばの子どもの多くはエッキーを知っています。また、地球科学や自然災害の専門家の方の多くもご存知です。でも、人類全体からいうとそれはごく一部の人に過ぎません。これまで、エッキーを体験していただいた方で最年少は 1 歳です。その一方で大学の講義にもふつうに使われるようになってきました。どんなレベルでも楽しみながら学べるエッキーを、災害現象に少しでも興味を持っていただくための入り口として、未体験の方にお試しいただければ幸いです。



全員で一斉エッキー！

エッキーについての参考文献

- ・ 納口恭明 (2001)：地盤液化化ボトル「エッキー」、防災科学技術研究所報告、61、49-53.
- ・ 少年写真新聞社 (2001)：液状化現象はどうしておきるのか？ペットボトル百科、36-37.

エッキー販売

- ・ 「選択キット・エッキー(地盤液化化実験ボトル)をつくろう！」
株式会社ナリカ





特許第3358178号地盤液状化実験ボトル

感性でとらえる地盤液状化の科学おもちゃ エッキー

2003年3月 第1版発行

2007年3月 第2版発行

2014年3月 第3版発行

2016年3月 改訂第1版発行

発行：防災科学技術研究所

〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1

TEL：029-863-7783 / FAX：029-863-7699

HP： <http://www.bosai.go.jp/>

E-Mail： toiawase@bosai.go.jp

著：納口恭明

絵：宮本浩江



防災科研

(2019.03.10000)