

地盤液状化実験ボトル「エッキー」

納口恭明*

Liquefaction Simulator “Licky” for Science Education

By

Yasuaki NOHGUCHI

*Atmospheric and Hydrospheric Science Division
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
nhg@bosai.go.jp*

Abstract

The phenomenon of liquefaction is one of the most interesting demonstrations for science education because it illustrates the strange behaviors that go beyond the realm of common sense. For this purpose we developed a simulator named Licky which can easily simulate this phenomenon any time, anywhere and on many occasions. The simulator comprises a closed bottle, fluid, granular material and some pins. This simulation is set up by shaking the bottle and by mixing the fluid and granular material. The liquefaction is generated by hitting the bottle, and as a result under certain conditions the pins rise to the surface of the sediment of the granular material and under other conditions sink into the sediment. In this paper we introduce the fundamental theory of the law of similarity and the mechanism for setting up this apparatus.

Key words: Liquefaction, Science education, Similarity law

1. はじめに

地震で発生する地盤の液状化現象(佐藤, 1995)は自然災害現象のひとつであるが, そのデモンストレーションは青少年向けの科学イベントでは大変人気の高い出し物のひとつでもある。飽和した砂地盤が, 震動によって, 一瞬のうちに液体のように振る舞う液状化現象は, 本来は地盤に支えられて固定している地上及び地中の構造物をまるで, 海に漂う船のようにしてしまう。このため, 実際にこのような現象が都会で起こると災害を引き起こす一方で, 実験室レベルで再現される液状化現象は, 日常の直感を超えているため, この現象を初めて見る者には科学的な不思議さから来る感動を与える。

実験室レベルでの液状化実験は古くから行われており, 装置はかなり大掛かりなものである。これに対し納口は粉粒体と液体が入った密閉容器という閉鎖空間の中

で, いつでもどこでも何度でも液状化にともなう様々な現象を簡便なミニチュアサイズで再現できるシミュレータ(地盤液状化実験ボトル「エッキー」: 英語名は“Licky”)を考案した(納口, 1999, 2000 a, 2000 b)。「エッキー」は容器を揺動することにより, 密閉容器中の粉粒体と液体が一様に混合した状態を作り, その状態でそっと容器を静止させ, 容器中の粉粒体を容器の底に沈澱させることによって, 液状化実験が可能な状態にセットする。その状態で, 容器に衝撃を与えて液状化を起こさせるものである。本論文は, そのシミュレータの基礎理論である。

2. 重力場中にある流体中を一様に沈降する粉粒体の流動化の相似則

「エッキー」による実験はすべて, 粉粒体と液体の入っ

*防災科学技術研究所 気圏・水圏地球科学技術研究部

ている密閉容器を揺動して粉粒体と液体とを均一に混合させ、それを静止させることから始める。粉粒体の体積が容器の容量よりも少なければ、粉粒体は流体中を沈降し、容器の底に沈殿する。この、沈降中の粉粒体と液体とからなる流体が、見かけ上、一体となった混相流体として振る舞うための条件をはじめに導出する。

静止流体中の単一粒子の終速度を v_e とする。このとき、粒子が終速度に達しているかどうかのスケールとなる距離 l_c を

$$l_c = v_e^2 / g^* \quad (1)$$

のように定義する(納口, 2001)。ただし、 $g^* = (\rho_s - \rho_l) / \rho_s \cdot g$ である (ρ_s , ρ_l はそれぞれ粒子と流体の密度, g は重力加速度)。ここで、流体の深さを L とすると(粒子から見ると、粒子が沈降しうる距離)、

$$l_c / L = F \ll 1 \quad (2)$$

のとき、粒子は終速度すなわち定常的な速度になり、その結果として粒子の重量は周りの流体が支えることになる。流体が上昇速度 v_e をもつ場合は粒子は沈降せず、その位置にとどまることになる。

つぎに流体中に巨視的に見て均一に分布している粒子群を考える。このとき、全空間に対して粒子が占める体積比率、すなわち充填率を ϵ 、粒子の平均的な沈降速度を u_p 、粒子とその周りの流体の平均的な速度を u_f すると、 u_f は粒子の沈降を補償するための流れであるので、

$$\epsilon u_p + (1 - \epsilon) u_f = 0 \quad (3)$$

から u_f は

$$u_f = -\epsilon / (1 - \epsilon) \cdot u_p \quad (4)$$

となる。したがって、粒子と流体との平均的な相対速度 v は

$$v = u_p - u_f = u_p / (1 - \epsilon) \quad (5)$$

となる。充填率 ϵ が十分小さければ $v = u_p$ とみなせる。

この相対速度 v が単一粒子の終速度 v_e の時、粒子の重量は流体に支えられ、流体の圧力は粒子の重量の分だけ増加し、粒子と流体とからなる混合体は、見かけ上一体となった重たい混相流体に変わることになる。このとき粒子の平均的な沈降速度は(5)式から

$$u_p = (1 - \epsilon) v_e \quad (6)$$

となる。充填率ゼロのときは粒子の沈降速度 u_p はこの単一粒子の終速度 v_e になり、充填率が大きくなるにつれて沈降速度は小さくなる。このような定常に達した一体化した状態を流動化状態と呼ぶことにする。この状態では流体と粉粒体からなる混相体は単一の流体として振る舞う。この混相流体層に上昇速度 $(1 - \epsilon)v_e$ の流体が流れ込めば粉粒体は平均的には沈降せず充填率 ϵ で浮遊状態となる。これは流動層としてよく知られている流動状態である。逆の見方をすると、はじめの系は、重力で沈

降している粉粒体の平均速度とともに下方に移動している系から見た流動層とみなせる。

つぎにこのような状態になるための条件を求める。いま粒子が一樣に距離 L_p だけ下方に移動したとすると、これにともなって流体が移動する距離 L_f は

$$\epsilon L_p = (1 - \epsilon) L_f \quad (7)$$

から

$$L_f = \epsilon / (1 - \epsilon) \cdot L_p \quad (8)$$

となり、したがって流体に対する粒子の相対移動距離 L_r は

$$L_r = L_p + L_f = L_p / (1 - \epsilon) \quad (9)$$

となる。充填率 ϵ が小さい場合は $L_r = L_p$ とみなせる。

このとき一個の粒子の沈降の定常に関する無次元数は、(1)式の L を(9)式の L_r とみなせば

$$l_c / L = l_c / L_r = (1 - \epsilon) v_e^2 / L_p g^* \quad (10)$$

となり、

$$(1 - \epsilon) v_e^2 / L_p g^* \ll 1 \quad (11)$$

の条件下では流動化が発生する。充填率 ϵ がゼロの場合(11)式は(2)式と一致する。

3. 沈殿静止した粉粒体の流動化の相似則

「エッキー」の実験では、密閉容器の底に沈殿、静止した粉粒体に、容器を叩くなどの衝撃を与えて、いわゆる液状化を発生させる。そこで、上述の延長として、一旦、底に沈殿、静止した粉粒体層の粒子間結合がバラバラになった状態で、この粉粒体と流体との混合体が、見かけ上一体化した混相流体となる条件を求める。

一般に、充填率 ϵ はある値以下では静止固体としては存在しない。静止固体として存在しうる最小の値を ϵ_{min} 、それ以上は充填できない最大値を ϵ_{max} とする。一旦、容器の底に沈殿、静止した粉粒体でも充填率が ϵ_{max} 以下では、まだ沈降する余裕がある。このように、充填率 ϵ が ϵ_{min} 以上で起こる流動化がいわゆる液状化に対応するものである。 ϵ_{min} と ϵ_{max} の差はその絶対値に比べて余り大きくない。すなわち $(\epsilon_{max} - \epsilon_{min}) / \epsilon_{min} \ll 1$ 。充填率 ϵ が ϵ_{min} 以上でまだ沈降できる深さを ΔL とすると、液状化の状態を特徴づける無次元数は(10)式から

$$(1 - \epsilon) v_e^2 / \Delta L g^* \equiv F_l \quad (12)$$

となる。この値が1よりも十分に小さくなると流体的な挙動を示す液状化現象となる。

したがって、この式から液状化が起きやすい条件が定性的に表現される。初めに、流体中の粒子の自由落下終速度 v_e が小さいこと、沈降可能な距離 ΔL が大きいことなどである。沈降可能距離は、流体で飽和された粉粒体の層の厚さが大きいほど大きい。また、同じ状態の層に対しては衝撃量が大きいほど大きくなる。 v_e については

粒子が小さいほど小さく、また、密度差、流体の粘性にも依存する。同じシステムでも環境の流体が水の場合は液状化が起こるのに対して空気の場合には液状化しないのは、 v_e の値の大きな違いによっている。

このように液状化が起こる条件下での液状化継続時間 T は沈降距離 ΔL と粒子の(6)式の沈降速度から

$$T = \Delta L / u_p = \Delta L / (1 - \varepsilon) v_e \quad (13)$$

となる。

充填率 ε_{\min} 以上で静止固体となっている飽和粉粒体に衝撃を与えたときの沈降距離を ΔL_{if} とする。この値は衝撃の大きさに関係しており、したがって、液状化するか否かは衝撃の与え方にも依存することになる。衝撃を与える前後の初期の充填率をそれぞれ $\varepsilon_i, \varepsilon_f$ (ただし $\varepsilon_{\min} < \varepsilon_i < \varepsilon_f < \varepsilon_{\max}$) とすると ΔL_{if} は

$$\Delta L_{if} = (1 - \varepsilon_i / \varepsilon_f) L_i \quad (14)$$

となる。ただし L_i は初期層厚。

一回の衝撃で沈降する距離を小さくすると、(12)式の F_1 は大きくなり、液状化条件を満たさなくなる。すなわち一度の衝撃による沈降 ΔL_{if} では液状化が起きる場合でも、小さな衝撃の繰り返しで、その都度の沈降量を小さくして合計で ΔL_{if} となるように

$$\Delta L_{if} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \dots \quad (15)$$

とした場合は、それぞれの沈降量 $\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3 \dots$ にたいしては液状化を起こさずに沈降だけをさせることができることになる。その結果として、充填率 ε が ε_{\max} になるか、あるいは限りなく近づいて残りの沈降可能量が液状化条件を満たさなくなれば、液状化は起こらなくなる。

4. 「エッキー」における混相流体の密度

ここで、「エッキー」の実験に現れる混相流体の密度をまとめる。

密閉容器ボトルの大きさを、簡単のため高さ a の直方体とする。この中に粉粒体と流体が入っている。初めに容器を揺動して容器内の粉粒体と流体が完全に均一になるようにして静かに置くと図1のような過程を経て粉粒体は沈殿する。この時、粉粒体物質の密度を ρ_s 、流体の密度を ρ_f 、初期均一混相流体の密度を ρ_i 、沈殿した混相流体の密度を ρ_t とする。また初期均一混相流体における粉粒体の充填率を ε_i 、沈殿混相流体における粉粒体の充填率を ε_f (ε_f は実際には ε_{\max} から ε_{\min} まで変化する) とする。このとき

$$\rho_i = \varepsilon_i \rho_s + (1 - \varepsilon_i) \rho_f \quad (16)$$

$$\rho_t = \varepsilon_f \rho_s + (1 - \varepsilon_f) \rho_f \quad (17)$$

となる。また完全に沈殿した粉粒体層の厚さを a_f とすると、質量保存式

$$\rho_i a = \rho_f a_f + \rho_i (a - a_f) \quad (18)$$

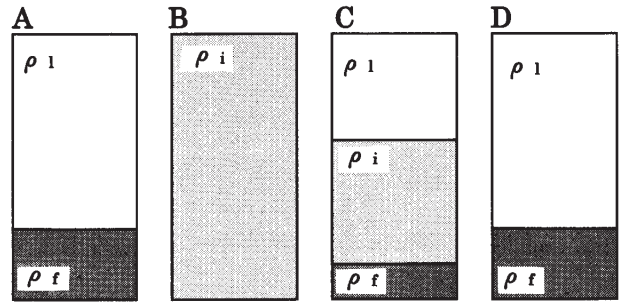


図1 粉粒体の沈降にともなって現れる混相流体とその密度。A：はじめの状態 (ρ_f は流体の密度、 ρ_s は沈殿している粉粒体と流体からなる混相流体の密度)。B：粉粒体と流体を均一に混合した状態 (ρ_i はその状態の混相流体の密度)。C：粉粒体が沈降し、すでに底に沈殿しはじめている状態。D：粉粒体が完全に沈殿してしまっ状態

Fig. 1 Multiphase flows and their densities during the mixing and settling of granular material and fluid. A is the initial state before mixing. ρ_f is the density of the fluid and ρ_s is the density of the sediment. B is the state during mixing. ρ_i is the density of the multiphase flow in this state. C is the settling state. D is the completely settled state.

から、

$$\rho_i = \rho_f a + \rho_i (1 - a) \quad (19)$$

となる。すなわち a_f と a の比 $\alpha = a_f / a$ の組み合わせで ρ_i が決まる。

5. 液状化に伴う諸現象再現の仕掛け

液状化の結果として現れる現象として、地上の重いものが地中に沈む、地下の軽いものが地上に浮き上がる、地盤が支持力を失ってビルが傾く、噴砂・噴水が生じる、などがある。これらの現象をいつでもどこでも何度でも再現できる仕掛けについて述べる。

5.1 物体が浮きあがる「エッキー」の仕掛け

この容器の中に体積 V 、平均密度 ρ_e の物体をいれる。この平均密度 ρ_e が

$$\rho_i < \rho_e < \rho_t \quad (20)$$

でかつ流動化条件(11)式が満たされているとき、粉粒体が均一になるように容器を揺動した後、静止し、粉粒体を沈降させる。このとき、物体に働く力は重力 $\rho_e V$ と流動化した混相流体の浮力 $\rho_i V$ だけである。ところで物体の密度 ρ_e は ρ_i よりも大きいので、すぐに底に沈み (図2 A)、その上から粉粒体が沈降して物体を埋め尽くす。このとき、沈殿した粉粒体と流体からなる層の密度は物体の密度よりも大きいはまだ液状化していないので、物体にかかる力は重力 $\rho_e V$ 、流体のみの浮力 $\rho_f V$ 、粉粒体からの支持力 R (図2 B, C) である。したがって、物体は沈んだままである。

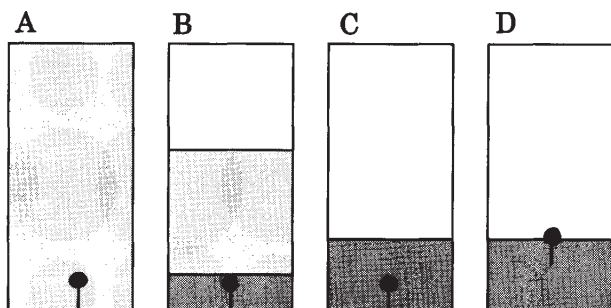


図2 浮き上がる「エッキー」実験の方法。混合と沈降によって実験ができる状態にセットされ (A, B, C), 衝撃によって液状化が起こる (D)。

Fig. 2 Experimental method for the rising phenomenon caused by liquefaction. The simulator, *Licky*, is set up for the experiment by mixing and settling a granular material and fluid (A, B, C), and the liquefaction occurs with a mechanical shock (D).

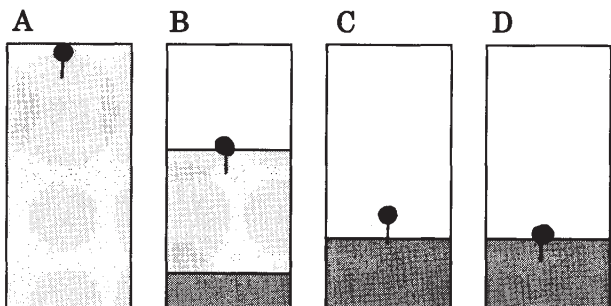


図3 沈み込む「エッキー」実験方法。混合と沈降によって実験ができる状態にセットされ (A, B, C), 衝撃によって液状化が起こる (D)。

Fig. 3 Experimental method for the sinking phenomenon caused by liquefaction. The simulator, *Licky*, is set up for the experiment by mixing and settling a granular material and fluid (A, B, C), and the liquefaction occurs with a mechanical shock (D).

ここで、衝撃を密閉容器に与える。このとき液状化の無次元数(12)式が1よりも十分に小さくなる条件下では粉粒体層は液状化し、見かけ密度が ρ_f の混相流体となる。このとき物体に作用する力は、粉粒体からの支持力がゼロになり、浮力 $\rho_f V$ と重力 $\rho_e V$ だけとなる。したがって、物体は流体のみの層と混相流体の層の界面まで浮上する (図2 D)。

図中で示されるように実際の実験では物体としてマップピンを用いている。マップピンは頭部が球形のプラスチック製であり、浮きの役目をしており、ピンは重りの役目をしている。これらのバランスで、適度な物体の長さ、平均密度をつくりだすことができる。

5.2 物体が沈み込む「エッキー」の仕掛け

つぎに、物体の密度条件が(20)式のかわりに、

$$\rho_1 < \rho_e < \rho_1 \quad (21)$$

の場合を考える。この場合も同様に粉粒体が均一になるように容器を揺動し、その後、静止し、粉粒体を沈降させる。流動条件下での力のバランスから、物体は流動層と流体のみの層の界面でバランスし、界面の低下とともに沈降していき (図3 B), やがて物体はすでに沈澱している粉粒体層に着地したところで止まる (図3 C)。これは、沈澱した状態の粉粒体層は液状化していないので支持力が存在するためである。

ここで、衝撃を容器に与えることにより、粉粒体層は液状化し、支持力が消失するので、物体は浮力と重力が釣り合う位置まで沈み込む (図3 D)。

5.1の物体が浮き上がる「エッキー」において、容器全体に粉粒体が均一分布するように揺動するのではなく、容器の下の適当な部分だけに局在するように不均一に揺動できたとする。このとき、濃厚な初期密度 ρ_{12} は ρ_1 よりも大きくなる。その結果、物体が浮き上がる「エッキー」の条件(20)が満たされるときでも、適当な不均一の揺動によって、物体が沈み込む「エッキー」の条件

$$\rho_1 < \rho_e < \rho_{12} \quad (22)$$

が満たされれば、物体が沈み込む「エッキー」となる。

また、浮き上がる条件(20)を満たす密度 ρ_{e1} の物体と沈み込む条件(21)を満たす密度 ρ_{e2} の物体を同時に容器に入れることで、

$$\rho_1 < \rho_{e2} < \rho_1 < \rho_{e1} < \rho_f \quad (23)$$

から、沈み込みと浮き上がりを一度に見せることができる「エッキー」 (図4) ができる。

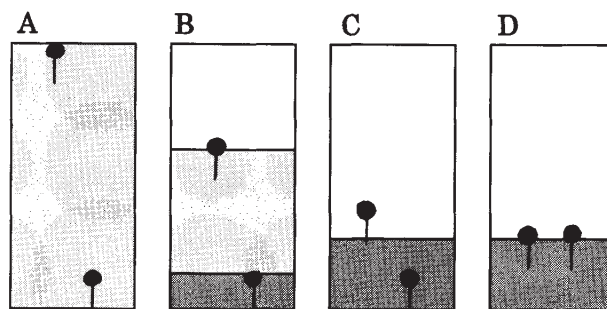


図4 同時に浮き沈みする「エッキー」実験方法。混合と沈降によって実験ができる状態にセットされ (A, B, C), 衝撃によって液状化が起こる (D)。

Fig. 4 Experimental method for the rising and sinking phenomena caused by liquefaction. The simulator, *Licky*, is set up for the experiment by mixing and settling a granular material and fluid (A, B, C), and the liquefaction occurs with a mechanical shock (D).

5.3 その他の「エッキー」について

重心が高くなるにつれ、また浮力の中心が低くなるにつれ物体の正立状態は不安定になる。重心が浮力の中心よりも下であれば、これだけが作用する状態では安定して正立しているが、物体が底面に着地した場合、底面からの反作用によって、物体の正立状態は不安定となることがある。底面で物体が沈澱している粉粒体の支持力で正立している場合でも、上記の不安定条件が成り立てば、液状化で粉粒体からの支持力の消失にともなって正立状態が不安定化した物体は傾き、倒れる(図5)。

5.2の物体が浮き沈みする「エッキー」で、容器を横に倒し、最短の辺を縦にする。このとき、上記の倒れる「エッキー」の条件を満たせば、一つの容器の中で、これまで紹介したすべての現象が再現できる。

ところで、これまで、粉粒体物質の密度 ρ_s を暗黙の内に流体の密度 ρ_l よりも大きいものとして扱ってきた。しかし、 $\rho_s < \rho_l$ の場合、これまで述べてきた現象がすべて逆さで起こる。このような現象を「逆さ液状化現象」、逆さ液状化実験ボトルを「逆さエッキー」と呼ぶことにする。「逆さエッキー」では浮き上がる現象が沈む現象になり、沈む現象が浮き上がる現象になる。

6. おわりに

本論文では、地震による液状化現象を、科学教育用の素材として、いつでも、どこでも何度でも簡単に再現できることを目的に、その実験装置の仕掛けの基礎理論を示した。なお、本論文では、地盤液状化実験ボトル「エッキー」の実際の実施例は示さなかったが、現在作製している最小の「エッキー」は容器の容量が3cc程度の小さなものである。相似のところで述べたように、容量が小

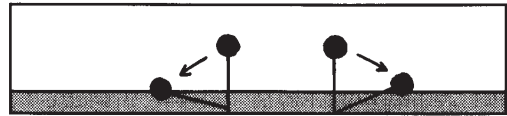


図5 倒れる「エッキー」実験

Fig. 5 Experiment to demonstrate the falling phenomenon caused by liquefaction.

さくなるにつれて、粉粒体の粒径も小さくしなければ相似は保たれない。言い換えると、相似を満たす材料さえ入手できればいくらかでも小さくすることも可能である。

なお、本実験装置は「地盤液状化実験ボトル」として特許出願中である。

参考文献

- 1) 納口恭明(1999)：自然災害の科学教室—地盤液状化現象の科学手品「エッキー」(1)—。防災科研ニュース, No. 129, 10-11.
- 2) 納口恭明(2000 a)：自然災害の科学教室—地盤液状化現象の科学手品「エッキー」(2)—。防災科研ニュース, No. 130, 12-13.
- 3) 納口恭明(2000 b)：自然災害の科学教室—地盤液状化現象の科学手品「エッキー」(3)—。防災科研ニュース, No. 132, 10-11.
- 4) 納口恭明(2001)：粒子なだれの相似について。防災科学技術研究所研究報告, No. 61, 15-19.
- 5) 佐藤忠信(1995)：地震時の砂地盤の液状化。混相流, 9, 188-199.

(原稿受理：2000年12月18日)

要 旨

地震による地盤液状化現象は、災害をもたらす自然現象というだけでなく、現象自体の直感を越えた不思議な性質のため、科学教育用の素材としての研究意義をもつ。このためいつでも、どこでも、何度でも、実演が簡単にできる液状化現象の実験装置を考案した。この装置は、密閉容器と液体と粉粒体とピンから構成されており、容器を揺動し、液体と粉粒体とを混合することによって、実験の初期状態がセットされる。この容器を叩くことによって、液状化が発生し、条件によってピンが粉粒体沈澱物の表面に浮き上がってきたり、沈み込んだりする。本論文では、この仕掛けについての基礎理論を紹介する。

キーワード：液状化, 科学教育, 相似則