

飽和砂の剪断に伴う P 波の発見と P 波による液化の発見 — 液状化の本質的原因とは何か？

教育おもちゃエッキーによる定性実験とその考察 (1)

殿上 義久*

Discovery of (Sound) P-wave associated with shearing of saturated sand and discovery of
sand liquefaction by P-wave—What is the essential cause of sand liquefaction?

Qualitative experiment with educational toy Ekki and its consideration (1)

Yoshihisa TONOGAMI*

Abstract

Ekki is an educational toy invented in 2001 by Dr. Yasuaki Noguchi of the NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention). It has a simple structure in which a PET bottle is filled with sand, fragments of eraser, and plastic thumbtacks with a spherical head, which is filled with water. Since the natural loose saturated sand itself can be used, there is no doubt that it can be used for qualitative experiments of liquefaction in various fields. The author found that the sand liquefies when the Ekki is placed vertically on a rotary table, the central axis (Z axis) is fixed, and the sand is rotated at a rate of four times per second alternately on the left and right. In general, when saturated granules are sheared, P waves (sound) are generated due to collisions between soil particles of soil mass facing each other across the sheared cross section, friction, and crushing of the soil particles themselves. When this sound is picked up by the PZT element and rotated several tens of times while listening to it, magnetite originally contained in the sand is concentrated in the sand under the shear plane in a band shape with a thickness of about 3 mm. And the author noticed that the depth from shearing plane increases as the distance from the center of rotation increases. This phenomenon is the same principle as panning performed by gold dust digging, and magnetite with a heavy specific density is concentrated near the lower limit of liquefied sand. The author describes the increase in sound intensity with torsional shear of saturated sand and the increase in liquefaction depth with increasing radius and argues that the true cause of liquefaction is the P-wave.

Keywords: Ekki, Shearing sound of saturated sand, P-wave, S-wave, Liquefaction by P-wave

緒言

岩本 (1983) は, Seed and Lee (1966) 以来の液状化理論を次のように定説化した. すなわち, 地震動による飽和砂の繰返しせん断→負のダイレイタンス特性による圧縮の傾向→非排水のゆえに圧縮出来ない→砂層を支えるための過剰間隙水圧の発生と累積→有効拘束圧の減少→粒子間のかみ合わせがはずれる→せん断抵抗を失う→液状化するというプロセスである. 著者はこの剪断による液状化を従来通り液状化と呼ぶ. 一方, P 波によって引き起こされる

液状化を改めて液化と呼ぶ. 本論文は, エッキーとして知られる教育用おもちゃを使用して, 液化原因の本質が P 波であることを証明しようとするものである. 本論の他にも P 波による液状化説明の試みはある. Tsaparli et al. (2018) は, 2011 年 2 月 22 日のニュージーランド・クライストチャーチ地震のイベント垂直成分の測定された地表面応答スペクトル周波数応答が 10 Hz 付近で 25 ms^{-2} から 65 ms^{-2} の大きな範囲にあり, 「堆積物が垂直方向の地動のみを受けたとしても, 地震荷重は, 液状化を引き起こす重大な偏差応力の発生につながるほど十分に強力」であると結論づけ

* 音響地質学研究所, Email: tonogami1947@ac.auone-net.jp

ている。

本論文は、3通りの定性実験からP波による飽和砂の液化こそが本質であることを証明しようという最初の試みである。3通りの定性実験とは以下のものである。

- すなわち、
- ①エッキーを垂直にして回転台に乗せ左右交互の回転を与えて内部の砂にねじり剪断を与えて音の発生を確認する実験。
 - ②エッキー内部の砂に類似した粒度を持った#60のサンドペーパーを洗面器中で擦り合わせて上の実験と同じ音が出ることを確認実験。
 - ③#60のサンドペーパーをエッキーに貼り付け、エッキーをリセット(後に述べる)の後、#60のサンドペーパーで擦る音でエッキー内部の浮きが浮上するかどうかの実験。
 - ④エッキーの往復回転を20~30回続けて剪断面化の液化部下底面付近に比重の大きい磁鉄鉱を濃集させてその形状から中心からの半径増加によって剪断面からの深度の増加を確認する実験。
- である。

エッキー

エッキーとは防災技術研究所の納口恭明氏が2001年に発明したものある。これは、ペットボトルに砂、消しゴム、頭の丸いプラスチック画紙を入れ、これに水を満たすといった単純な構成となっている。透明なプラスチックビンに入った飽和した自然の緩い砂そのものが使用できるので疑問の余地無く、多方面の定性的液化実験に使用可能である。ただし、実験一回ごとに上下を逆さにして、緩い砂の状態を作り直さなくてはならない。この動作をリセットと呼ぶ。

今回著者が行った定性実験は、エッキーを垂直に立てて回転台に乗せ、中心軸(Z軸)を固定し、左右交互に回転させるといったものである。本論文では、なぜ振動三軸圧縮試験器内の砂がS波によって液状化するのかという重要な疑問を解くため、P波による液化という観点から、複数の定性実験を読者とともに観察、評価する。まず、粒状体を剪断することの本質および粒状体の剪断から「音」が発生する原因、飽和砂の剪断音を聞く方法、エッキー内部の砂の剪断方法などの予備知識から述べよう。

粒状体の剪断と剪断音

一般に、粒状体の剪断は、剪断面を挟んで向かい合う土塊が互いに逆方向へ移動する過程で発生し、これら二つの土塊の境界面を決定するイベント(出来事)である。

効率よく二つの土塊をそれぞれが望む方向に動かすには、まず二つの土塊をまたぐ障害物となる土粒子の除去から始まるのが大事である。土粒子はその大きさにかかわらず、厚さ1mm程度の剪断面からの移動を余儀なくされ、右土

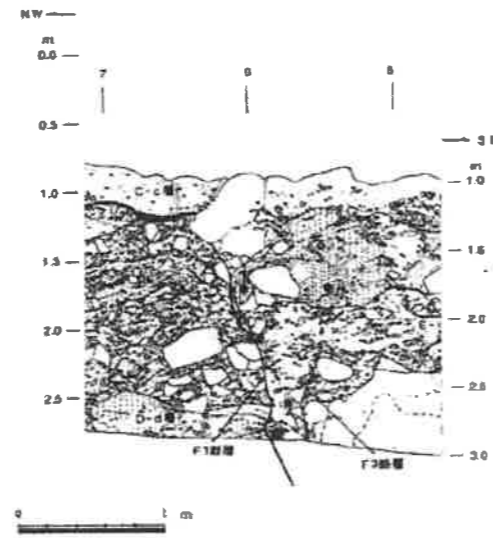


Fig. 1 岐阜県、高山・大原断層帯のトレンチ No.1 のスケッチ (岐阜県, 2000より抜粋・編集)

塊に入るか、左土塊に入るかの選択を迫られる。土粒子は自身で剪断の妨げとならないように剪断面から重心の移動と回転を始める。これはマクロに見ると、一面剪断試験、一軸圧縮試験、3軸圧縮試験における降伏点から破壊点に至る過程の土粒子の挙動を示すものである。障害物がおおかた排除され始めると加速的に剪断は容易となり剪断速度は速くなり剪断面が生まれる。

この過程は、スケールが異なるものの活断層における段丘礫層中の礫と同じであり、Fig. 1に活断層-高山・大原断層に関するトレンチ調査(岐阜県, 2000)からのスケッチ抜粋を示す。剪断面からの排除が遅れた土粒子は、自身が剪断されることとなる。硬い土粒子の剪断にはより大きなエネルギーが必要で、通常自然はこの大きなエネルギー消費を回避しようとする。剪断されない場合はその土塊の代表として反対側の剪断面に引っ掻き傷を残すことが許される。これが擦痕である。この剪断面形成過程での土粒子の挙動は、土粒子が詰まった中で行われるため、隣り合う土粒子同士の衝突、摩擦、土粒子自体の破砕などがおきる。つまり、粒状体の剪断は不可避免的にP波(音)の発生を伴う。このとき発生する剪断音について触れた論文は著者が不勉強のためかほとんどないと思う。次に粒状体の剪断音を聞く方法について触れよう。

剪断音を空气中で聞く方法

この「音」は、洗面器に水と砂を入れ、手で砂を剪断するとやや聞きづらいが、洗面器の片側を持ち上げて行くと「ザクザク」といった音を直接聞くことができる(Fig. 2参照)。

一般的に固体中や、液体中の音は、密度 ρ とP波伝播速



Fig. 2 飽和した豊浦砂を手で剪断するとザクザクという音が聞こえる(日本人は米を研ぐという作業を無意識に2000年以上の長きにわたって行っているがこれは米の粒子を回転させ、摩擦させて表面を削り取る最良の方法である)



Fig. 3 エッキーのキャップにPZT素子を装着し内部の砂の剪断音がカセットレコーダーからきこえるようにした状態、内部にある画紙が壁に当たると大きな音を出すので取り除いてから実験に入ることを推薦したい

度 c の積である $\rho \cdot c$ (ローシー:音響インピーダンス)の違いにより、空気中に浸透・放出されるP波の強度は2000分の一程度となってしまう。このため剪断音は無いと思っている研究者は少なくないと思われる。この音をインピーダンスの壁無しに聞くためにはPZT(ピエゾ素子)が必要である。前のFig. 3は、ギターのチューニングで使用するPZT素子(ピックアップ、楽器店などで安価に購入できる)と固体中のP波を電氣的に増幅する普通のカセットテープ・レコーダーを示す。先に述べたエッキーにピックアップを装着し「剪断音」をモニターする実験に入るが、

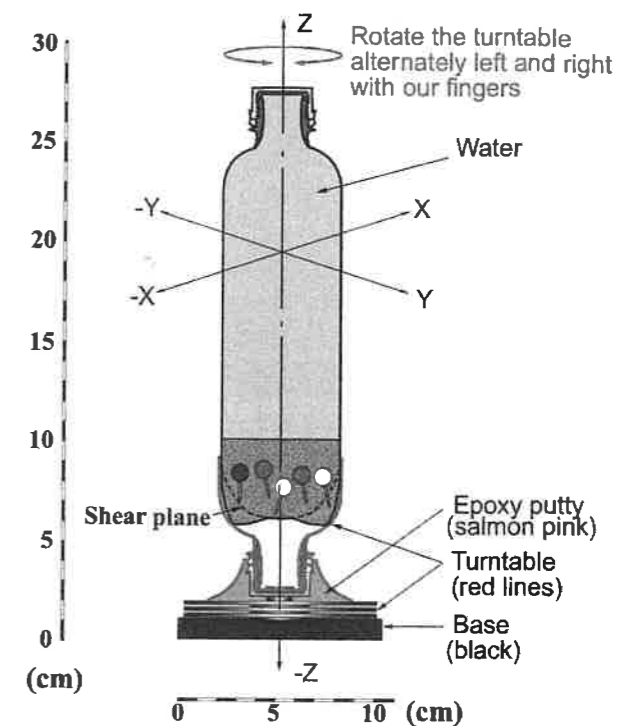


Fig. 4 エッキーを垂直に立てて左右に回転を与える方法およびエッキーにおけるX軸、Y軸、Z軸の位置関係と5枚のペーンに相当する強制剪断面の形状(図中の破線で表示)

読者にもう少し我慢をお願いする。私たちはエッキーについて無知であるためエッキー内の砂に剪断を起こす方法を知らなくてはならない。

エッキーと内部の砂の剪断方法

エッキー内部の砂の剪断方法は沢山ある。先述のもの以下、あらためて次に示す。

- ①エッキーを垂直に立てて回転台に乗せ、中心軸(Z軸)を固定してこれを左右に回転する方法(Fig. 4):自重による拘束圧のかかった状態で砂同士の剪断できるので比較的に大きな音が出る。
- ②Z軸を水平にしてこの軸に沿って回転させる方法:表面滑りにより厚さ1mm程度の層が液状化する。この場合、剪断音を下から受ける。発生する音は、上載荷重がないので小さい。
- ③この水平に置いたZ軸に直交するX軸(Y軸)を定めこれを垂直にし、これに沿って水平に回転させる方法:砂は底側、キャップ側、あるいは両者に偏り、回転速度による遠心力と重力の釣り合いのため表面角度に変化が生じる際に剪断音を発する。音の強度は絶え間なく変化する。回転させるため目視による観察が困難で、傾斜角の測定にも特殊な装置が必要である。この実験は、困

難であり著者は行わなかった。

④再度 Z 軸を垂直とし、これに直交する X 軸 (Y 軸) を水平に定めこれに沿って回転させる方法：砂は砂の傾斜が安息角になると安息角での表面滑りを生じ、容器の傾斜が安息角を超えると、土石流のような状態に移行する (X 軸, Y 軸を変えても同じ効果を得る)。土石流状態では剪断は、主に容器と砂の間で起きる。土石流状態での音はダイナミックである。ただし、土粒子が水中落下するのでポイリングと似た状況である。

以上が 4 種類の剪断方法のすべてである。興味がある読者はエッキで発生するすべての剪断音を聞いて欲しい。

さて、予備知識が十分に得られたと思うので定性実験に移ろう。

エッキ内部の砂の剪断音の発見

Fig. 3 にしたがって剪断音を聞きつつ、Fig. 3 の回転台の金属製円盤を 1 秒間に 1 回…2 回と増やしながら毎秒 4 往復程度になると砂の剪断音が発生するのが確認できる。カセットテレコからリズムカルにザザザッザッという音が発生する。砂が飽和砂の自重による剪断抵抗力に打ち勝って発生する剪断音は、他の方法で得られる表層滑りの音と比べても力強いのが感じ取れる。剪断音の時間波形とパワースペクトルを Fig. 5 に示す。

図中、上段は音のパワースペクトル、周波数は対数目盛、左端 125 Hz~右端 100 kHz、10 kHz まではほぼ平坦、40 kHz には顕著なピークがある。これはエッキに使う PET ボトルの共振周波数でエッキを使用した試験にはすべて出現するピークである。このピークがなければ 10 kHz 以上の部分は右肩下がりのピンクランダムノイズと呼ばれる傾向を示す。下段は時間波形で横軸は 1.024 sec、8 個の山は半回転ごとの剪断音である。次に、この実験で得られる砂の液化範囲について述べる。

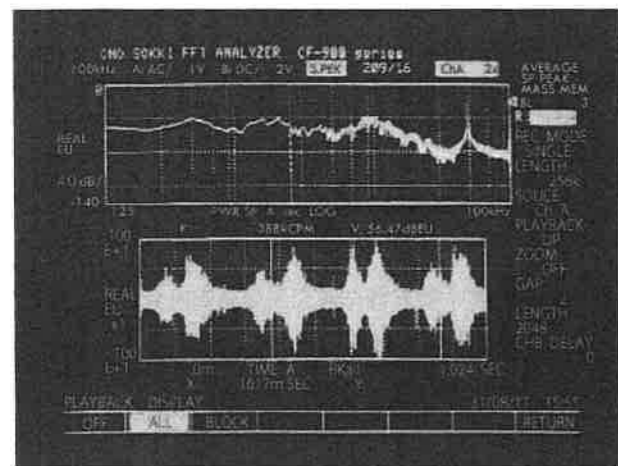


Fig. 5 エッキ内部の砂の剪断音の記録

液化部分の発見

さて、この回転を何 10 回繰り返したあと、剪断面下の砂中に、元から砂に含まれる磁鉄鉱が厚さ約数 mm の帯状に濃集するのを発見した。また、この磁鉄鉱濃集帯は強制剪断面の回転の中心から離れるに従って深さを増すことに気がついた。Fig. 4 に示したように、左右交互に回転するエッキの底部には炭酸飲料容器として 5 本の放射状の峰があり、この高まりのため、ペーン剪断試験と同様の強制剪断面ができる。ただし、通常のペーン剪断試験では回転軸に直交するペーン形状であるが、エッキの場合上に開いた放射線状の剪断面を形成する。また、この強制剪断面よりも上の砂と、剪断面よりも下にある砂の液化化原因には大きな違いがある。剪断面よりも上位にある砂は、ねじり剪断に伴う強い回転力により遠心力を受ける。また剪断時には、全体として周辺が高く中心部が低い鉢状の形状をなす。この部分の液化化の原因は、遠心力によって外に向かう砂に引きずられて水が吸い込まれることにあり、半回転ごとのポイリングによるものと思われる。一方剪断面の下では、上方の剪断面から拘束力を受けつつ P 波の放射を受けるから、P 波による液化が発生する。

液化する範囲内での土粒子は、重心の移動・回転・自励運動が自由である。この液化化した砂には比重の大きな磁鉄鉱やチタン鉄鉱が含まれるので、これが遠心力と液化時の重力の作用により側方と下方に濃集するので液化の範囲が分かる。この磁鉄鉱濃集帯の存在は、上からの P 波によって、強制剪断面よりも下の飽和砂が液化した範囲を示す証拠である。後の Fig. 6 はこの状況を撮影した写真、同じく後の Fig. 7 はこの状況を示す断面図である。

液化部分の形状の考察

Fig. 6, Fig. 7 の液化範囲を見てまず気がつくことは、破線で示した剪断面から下の液化範囲が深くないことである。今ひとつは強制剪断面の中心から外側に向かって深くなる傾向が見られることだ。この液化範囲が浅い原因は、強制剪断面から出る P 波が、封圧を制御出来ないで、全体を液化させるのに十分でないことが主因である。また、強制剪断面からの深さが外側ほど大きいのは、周速度が大きいほど、大きい音が発生していることが考えられる。ざっくりと計算してみよう。

周速度は円周の長さを時間で割ったものである。円周長さ L は $L=2\pi r$ でこれを時間で割ればよい。使用している砂は豊浦砂で中間粒径は 0.2 mm の細粒砂と呼ばれる範囲にある。エッキの胴体部の半径は 30 mm であるからエッキの壁面近くでの周長は、大まかに見て $2 \times 3.14 \times 30 = 188.4$ mm 実際に動く周長はこの半分程度の 90mm と見る。90 mm の長さを土粒子径 0.2 mm で割れば、450 個程度の土粒子がこの周長に含まれる。次に、時間波形であ

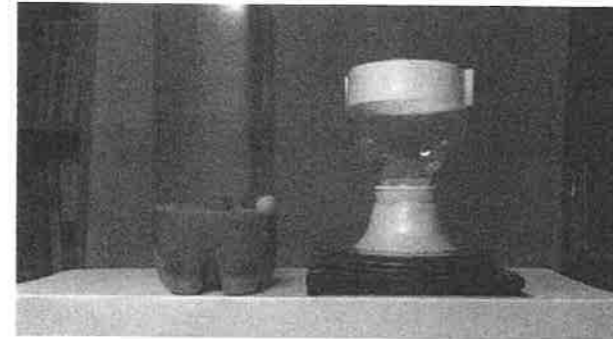


Fig. 6 黄土色の砂の下部に中心に向かってわずかに傾斜する黒い帯状の磁鉄鉱濃集帯の状況

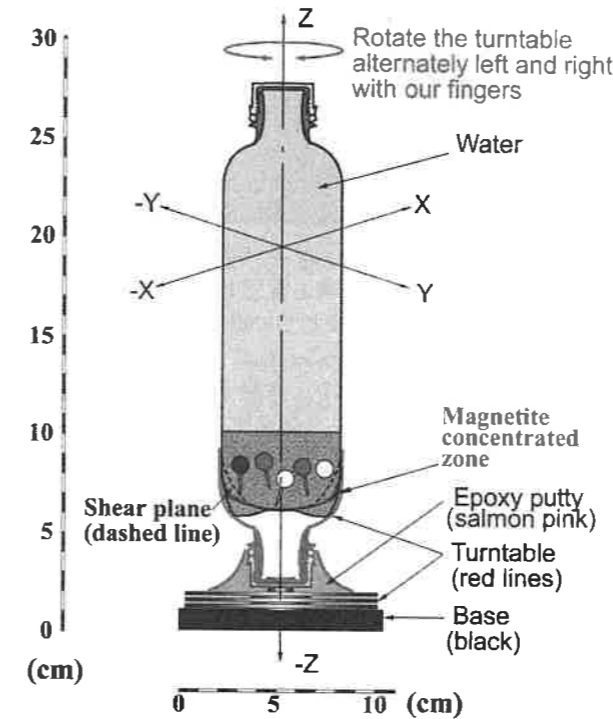


Fig. 7 左右の半回転ごとの剪断音を聞きながら数十回も繰り返すと赤字で示すような磁鉄鉱濃集帯が次第に形成される。これは破線で示す強制剪断面よりも下にあることから、剪断面から放射される P 波による液化範囲を示す証拠である。

るが、これを見ると山は 8 個であるが山が低い部分 (剪断音を発していない時間帯) は半分程度である。よって半回転あたりの剪断時間は 1/8 の半分の 1/16 sec 程度である。1 秒間の周速度は $90 \times 16 = 1,440$ mm/s に達し、剪断面を挟んで摩擦し合う、または衝突し合う粒子の数は $450 \text{ 個} \times 16 = 7200$ 個/毎秒であり、中心部から外側に向かって液化範囲が深くなるのは、この衝突あるいは摩擦し合う砂の粒子の個数及び拘束圧と音の大きさは無関係ではあり得ないように思われる。

以上考察したように、エッキ内部の飽和砂は上からの



Fig. 8 サンドペーパーのすり合わせにより Fig. 2 と同様の音が確認される

サンドペーパー同士のすり合わせとは剪断面を二枚の紙の中心に置くことである。よって土粒子の剪断と異なり重心の移動と回転主体であった砂の剪断と異なり、土粒子自体の破壊がエネルギー消費の主体となるためエネルギーとしてより大きなものとなる。

P 波によって液化した。また、その液化範囲が周速度と関係がありそうであるとの感触を得た。次に、もうすこし積極的に、外部からの音でエッキ内部の砂が液化する様子を見てみよう。

P 波の音源

P 波の音源については、今回のエッキで使用した豊浦砂と類似の粒度組成を持つ #60 番のサンドペーパーを使用することにする。Fig. 2 と同様、洗面器内に水を張り、ここにサンドペーパーを上向きに置き、もう一枚を下向きにして水中でこすり合わせた状況を示すのが Fig. 8 である。二枚をこすり合わせると豊浦砂の剪断時と類似の音が確認される。ただし、サンドペーパーの土粒子は耐水紙上に接着剤で固定されているので、はじめに説明したような土粒子の重心の移動や回転は起こりにくく、一般の粒状体の剪断よりも土粒子の大量の破壊という現象が生じる。一回の剪断により 0.2 mm の粒子は半分かそれ以下に小さくなり、洗面器の底には破壊された土粒子が多く沈殿する。全体としても粒度変化が生じるのは言うまでもない。その分、剪断には余分のエネルギーを必要とするし、発生する音はかなり力強く感じられるのではないだろうか。緒言で述べた三つの定性実験の内二つの定性実験が終わった。残り一つを紹介してゆこうと思う。

P 波による液化の発見

最後の定性実験は、エッキの外壁にサンドペーパーを貼り付けておき、もう一枚のサンドペーパーでこの表面を擦る実験である。サンドペーパーが発する音でエッキ内



Fig. 9 サンドペーパーで擦る前

球体の画鋲は-2 cm 程度の深さに分布している。リセットを行う際、砂の堆積が一定の深さに達したとき側壁を指で一度たたくとその深度に五つの球体画鋲が整列し、実験全体をわかりやすいものにする効果がある。



Fig. 10 サンドペーパーで擦った後

ねじり剪断が生じないように机に強く押しつけながらサンドペーパーは上下に擦り合わせた。P波は横から供給されていることに注意したい。-2 cm 付近にあった球体画鋲は、砂層表面まで浮上している。液化範囲は、ねじり剪断時よりも大きいことを示す。机上の砂はサンドペーパー同士の剪断による土粒子の細粒化を示す。

部の砂が液化するかしないかの実験である。実験に際しての注意事項は、固体内部ではP波がS波を発生させるおそれがあることから、内部に剪断が生じることのないようにエッキを回転台から外してしっかりと固定することである。エッキ内部の砂は、前述のように、有効な剪断面無しには剪断することなく（たとえば外壁ごと刀で剪断するようなことはない）、唯一可能なのはねじり剪断だけである。よって、ねじり剪断を阻止すれば良い。前掲の Fig. 9, 後の Fig. 10 は実験の前後をそれぞれ示している。エッキをリセットの上で実験を行った。（リセットの際、砂の堆積状況を見ながら指でたたいてやると、内部の画鋲はたたいた場所よりも数ミリ上で整列し、その上に更に砂が堆積してゆくの、狙った深さで画鋲を整列させることができる）。結果は、サンドペーパーのひと擦りで砂の表面よりも 2 cm 程度下方にあったすべての画鋲が一斉に浮き上がった。つまり、ねじり剪断での液化化範囲と比べると液化化に要する時間は短くサンドペーパーから発生するP波による液化範囲の方が圧倒的に大きいことがわかる。

飽和砂の剪断により発生する音は、砂の剪断の際に回転と重心の移動または摩擦と衝突でエネルギーの大半を使ってしまうため飽和砂の液化で発生する音のエネルギーは小さい。物理学の教科書では球体の衝突現象の説明に際して、

質点の質量・速度と反発係数は考慮されるが音のエネルギーは考慮されずに無視される。あるいは、サンドペーパーに摩擦係数があるので、サンドペーパーを押さえる力に比例した摩擦抵抗に打ち勝つ剪断力は計算可能であるが、発生する音のエネルギーを計算した科学者はいないと思われる。音は、このように無視される存在であった。さて、話を本題に戻して議論を先に進めよう。

考察・議論

以上記述してきたように、エッキの飽和砂は剪断に際して自ら剪断音を発して液化化し、P波でも液化することがわかった。中には混乱する読者もいるだろう。しかし実際の地震時にはどちらを原因として砂が液化するか考えれば答えは明瞭となる。

地震学（宇津，1985）が示すとおり先ずP波（Primary wave: 初めの波）が到着し、次いでS波（Secondary wave: 二番目の波）が到着する。そして、液化が一度起こると、液体の性質（小野，2012）として、S波は固体中を伝播するものの、気体や液体など剪断弾性係数ゼロのものは伝播しない。よって液化した砂の内部に侵入できなくなる。こ

れはS波による液化化にとっては厳しい拘束条件となる。一方P波は固体、液体、気体を伝播できる（小野，2012）性質を有している。しかも初めに到着して、実験で見たように砂を液化させる。その後も液体中でも固体中でもフリーパスであるから地表面近くまで一気に液化させることが可能なのだ。今回の定性実験では非常に弱いP波を使用している。しかし福島北海岸沖の太平洋（船位は震央から南西、約56 kmの北緯37°50'，東経141°30'付近）に行く試験航海中のフェリーボートが東日本大地震の海震（P波が海底から海水を伝播し直接船底に伝播するもの）に遭遇している。乗組員によると「海震遭遇時に、船底を突き上げる様な相当強い衝撃を受けた」という。船体に大きな激しい高周波数の上下動振動が発生し、振動は約3分間続いた。試験航海中のため振動を計測しており鉛直加速度は最大変動量1.1 Gを観測している（塩谷・笹健，2013）。東日本大地震のS波は前述のように海底から海中に伝播できない。にもかかわらずP波だけで1万トンクラスの船全体を揺らすエネルギーはどれほどのものだろうか。これと同じP波が太平洋沿岸の砂を液化させたのだ（津波に襲われた地域では液化の痕跡は失われているが千葉・茨城県などで顕著な液化被害が出たのは記憶に新しい）。

少し別な方向から見てみよう。もし、P波のない地震があったとしよう、緩い砂層の底面を剪断したとしても剪断面直上に剪断音による薄い液化層を形成する（実験で見た）と更に液化範囲を上方に広げる方法はない。液体中に侵入する方法がないのだ。世の中は広い、S波のない地震はある。例えば、アメリカのセネカガンズとバリソルガンズ（USGS，2005）、土石流の起こす地震（大角ほか，2007）、北朝鮮の地下核実験の地震（大石，2012）などがそれだ。しかしP波のない地震は存在しない。P波のみが液化の真の原因と考えられよう。

今回の一連の実験から振動三軸圧縮試験の場合でも、液化化へのP波の関与は疑う余地は無い。疑問に思う研究者は三軸圧縮試験のガラスシリンダーにPZT素子を貼り付けて音が出ているかどうかを試してみると良い。剪断応力の増加時にザッザッと強い音が出ているはずである。振動三軸圧縮試験機では拘束圧を実際の採取深度の有効応力に維持可能だから大きな音が発生するのである。エッキ内部での有効応力はせいぜい砂の厚さ7 cmに単位体積重量 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ を乗じた $9.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ であるが、振動三軸圧縮試験器ではこの100倍以上の拘束圧を掛けることが可能である。このため、剪断に要するエネルギーは大きくなるが液化化する範囲は供試体のサイズプラス α 程度であると考えられる。だが、我々が考慮すべきは剪断波の到着以前にP波のみで砂は液体になっていることなのであり、液体を剪断する試験に何の意味があるのかということなのだ。

今後の課題

2011年3月11日以降、今年までP波による定性的液化実験を行ってきた。今後次のような内容について発表をしてゆきたいと考えている。

- ①安息角0°の液化。
 - ②強いP波による30分の1秒以下の砂の液化及び減衰振動を発生させる方法。
 - ③P波パルスに対する応答液化時間の変化の原因。
 - ④同じ試料で17回以上も繰り返して液化が可能な液化。
 - ⑤P波による液化は上下、左右などの入射方向と無関係であること。
 - ⑥爆発的球面衝撃波による液化（Charlie, et al., 1988）。
 - ⑦液化した砂に現れるクレーターの発生原因。
 - ⑧液化後に現れる進行波、定常波について（Oxfordの地球物理学会誌からは出す雑誌が違くと拒絶された）（殿上，1986，1999）。
 - ⑨東北沖地震を音源とする液化（現在ロンドンの土木学会へ再投稿を準備中）。
 - ⑩締まった砂の液化は高粘性流体であること。
 - ⑪ボーリング孔内での砂の液化試験は可能であること（殿上，1988，2000）。
 - ⑫P波による液化は固体飽和砂の液体飽和砂への相転移に過ぎないこと（殿上，2000）。
 - ⑬地震時の砂地盤に対してP波とS波における役割は異なること（殿上，1986，1999，2000）。
 - ⑭飽和砂の液化メカニズム（水、砂の体積弾性率と音響インピーダンス及び音圧から直接的に得られるP波による液化メカニズム）。
- 等々について記述できればと考えている。

謝辞

以下の皆様の協力を得てきた。解散までの28年間にわたり年間平均200万円以上の研究資金を援助した有限会社ジオテックと殿上真由美氏、著者が作成した実験ビデオについて議論した以下の各位に、その名前を記して感謝する。国際地質科学連合（IUGS）環境管理研究委員会（GEM）常任理事・茨城大学名誉教授・日本地質学会理事：楡井久博士（故人）、元工学院大学教授 汐田正純博士、東海大学海洋学部資源学科名誉教授：星野通平博士（故人）、星野西原会：西原正武、工藤周一博士、矢嶋信幸、村山弘樹、山本和夫、北野国興、佐藤久夫、尾本幹生、下泰彦、山本裕彦博士、渡辺秀男博士、上砂正一（故人）、佐土原文博、北村健一郎、元石油公団地質地化学研究室：佐木和夫の各氏、そして実験に使用した豊浦砂を提供した株式会社セントラルソイル社長筒井雅二郎（故人）に感謝する。

引用文献

Charlie, W. A., D. O. Doehring, G. E. Veyera and H. A.

- Hassen (1988): Blast-Induced Pore Pressure and Liquefaction of Saturated Sand. Geo-technical Engineering Program Civil Engineering Department Colorado State University, Research Grant AFOSR-85-0172, 1-35. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a199995.pdf> (Accessed 11, Jan. 2014)
- 岐阜県 (2000): 高山・大原断層帯に関する調査トレンチ. 第4回活断層調査成果報告書予稿集, 文部科学省, 197pp. <https://www.gsj.jp/data/actfaulteq/h20seika/pdf/yoshio-ka.pdf> (Accessed 4th, Oct. 2021)
- 大石 真紀子 (2012): 地震学と核実験探知. https://web.archive.org/web/20120406150210/http://www.seis.nagoya-u.ac.jp/STAFF/ando_new/lecture/M.Oishi.pdf (Accessed 4th, Oct. 2021)
- 大角恒雄・長山孝彦・榎納智裕 (2007): 振動センサーによる土石流・地震・ノイズ識別検知に関する開発. こうえいフォーラム, (16), 93-101. https://www.n-koei.co.jp/rd/thesis/pdf/200712/forum16_012.pdf (Accessed 4th Oct. 2021)
- 小野 昞郎 (2012): 波動. 森北出版, 東京, 208pp. <https://www.morikita.co.jp/books/book/592> (Accessed 4th Jun. 2020)
- Seed, H. B. and Lee, K. L. (1966): Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading. Jour. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 105-134.
- 塩谷 茂明・笹健 児 (2013): 航行船舶が捉えた東日本震災時の海震の計測. 沿岸域学会誌, 26(3), 117-127.
- Tsaparli, V., S. Kontoe, D. Taborda, M. G. Potts, M. David (2018): Liquefaction Triggering Due to Compressional Waves: Validation Through Field Records. 16th European Conference on Earth-quake Engineering, Thessaloniki, Greek, 1-12. https://www.researchgate.net/publication/318659188_Liquefaction_modelling_of_a_strong_motion_station_in_Christchurch_New_Zealand (Accessed 4, Oct. 2021)
- 殿上義久 (1986): 液状化に伴う静振現象について. 昭和 61 年度研究発表会予稿集, 応用地質学会, 3-5.
- 殿上義久 (1988): 液状化判定方法および判定装置. (液状化の原位置試験に関する発明), 日本国特許第 2742798 号. <https://astamuse.com/ja/patent/granted/person/6537303> (Accessed 22nd Dec. 2019)
- 殿上義久 (1999): 液状化地盤の定常波, 委員会主催シンポジウム No.113, 液状化メカニズム・予測と設計法に関するシンポジウム, 発表論文集, セッション 5: 地震動と液状化メカニズム, 地盤工学会, 573-580.
- 殿上義久 (2000): 液飽和剛性粒状体の相転移, 液状化の室内試験器に関する特許 (拒否裁定) <https://astamuse.com/ja/patent/published/person/6537303?queryYear=2000> (Accessed 04th Jun. 2020)
- USGS (2005): Earthquake Booms, Seneca Guns, and Other Sounds. Earthquake Hazards Program. <http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/booms.php> (Accessed 31, Aug. 2013)
- 宇津徳治 (1985): 地震学. 第 2 版, 共立出版, 東京, 328pp.

要 旨

エッキーは防災技術研究所の納口恭明氏が 2001 年に発明した教育おもちゃである。これはペットボトルに砂、消しゴム、頭が球体のプラスチック画鋲を入れ、これに水を満たすといった単純な構成となっている。緩い飽和砂そのものを使用できることから疑問の余地無く、多方面の液化の定性実験に使用可能である。著者はエッキーを垂直に立てて回転台に乗せ、中心軸 (Z 軸) を固定し、左右交互に毎秒四回の割合で速く回転させると砂が液化することを発見した。一般に、飽和粒状体を剪断すると、剪断面を挟んで向かい合う土塊の土粒子同士の衝突、摩擦、土粒子自体の破砕などのため P 波 (音) が発生する。この音を PZT 素子で拾って聞きながら数十回か回転させると剪断面下の砂中に、元から砂に含まれる磁鉄鉱が厚さ約 3 mm の帯状に濃集し、回転の中心から離れるに従って剪断面からの深さを増すことに気がついた。この現象は砂金掘りが行うパンニングと同じ原理で、液化砂の下限付近に比重の重い磁鉄鉱が濃集したものである。著者は、飽和砂のねじり剪断に伴う音の強度と半径増加に伴う液化深さの増加について記述し、液状化の真の原因は P 波であると主張する。

キーワード: 飽和砂の剪断音, P 波, S 波, P 波による液化