

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24510246

研究課題名(和文) 液状化と流体移動：その多様性を実験と無次元数を用いて理解する

研究課題名(英文) Understanding the diversity of liquefaction and fluid transport using dimensionless numbers

研究代表者

隅田 育郎 (SUMITA, IKURO)

金沢大学・自然システム学系・准教授

研究者番号：90334747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：液状化が起きるための振動条件は何が決められているのだろうか。この問いに答えるために浅部に低浸透率層を持つ液体に浸された粒子層を鉛直に振動させる実験を(a) 加速度と周波数、(b) 液体の粘性率を変えて行なった。その結果(i) 低浸透率層の下に液体が貯留されて重力不安定が起きること、(ii) (i)が起きるための臨界加速度が存在しその値が最小となる周波数があること、(iii) 粘性率が高くなると臨界加速度が小さくなること、が分かりその物理を説明した。本結果は振動の加速度と速度の両方が液状化のために重要であり、高粘性率液体中では粒子間の潤滑の効果により液状化しやすくなる場合があることを示している。

研究成果の概要(英文)：We conducted a series of laboratory experiments in which a liquid-immersed granular medium with a less permeable upper layer is shaken vertically. We varied (a) the acceleration and frequency of shaking, and (b) the liquid viscosity. The experiments were conducted to understand the diversity and scaling relation of the phenomena associated with liquefaction. From the experiments we found that (i) a gravitational instability occurs as a consequence of accumulation of the liquid beneath the less permeable upper layer, (ii) there is a critical acceleration for the instability to occur, (iii) the critical acceleration decreases when the liquid has a higher viscosity. We formulated scaling laws to explain these results. Our results indicate that both shaking acceleration and velocity are important for liquefaction. Furthermore they show that when the liquid is more viscous, a granular medium can become more susceptible to liquefaction due to the enhanced interparticle lubrication.

研究分野：地球惑星ダイナミクス

キーワード：液状化 低浸透率層 地震 振動実験 噴砂 粉粒体 加速度 周波数

1. 研究開始当初の背景

地震に伴う液状化は土木工学、土質力学の分野で数多く研究されてきた。近年では例えば水を含む砂や土壌を地震波の卓越周波数帯 (1-10 Hz) で水平振動させ、液状化が層厚にどのように依存するかについて実験的研究がなされている (山口他, 2008)。しかし液状化が起きる振動条件が、振動の加速度あるいは速度のいずれかで決まっているのかはまだよく分かっていない。これは振動の周波数が限定されていたことが一つの原因である。またこれまでの研究では液状化の程度の定量化は間隙水圧の測定、または簡単な観察のみによって行われてきており、詳細な画像解析により定量化する試みは少ない。さらに液状化はより高粘性率の間隙流体を含むマグマでも起きることが指摘されており、火山の誘発噴火の原因の一つとされている。しかしその条件もよく分かっていない。本研究を開始するに先立ち、私達は浅部に低浸透率層を持つ水に浸された粉粒体に衝撃を与える実験を行った。そして画像解析から液状化に伴う圧密度が測定できることを示した (安田, 2012)。そこでこの実験に用いた装置を振動台に載せて加速度、周波数を変えて振動実験を行い、液状化が起きるための振動条件を幅広いパラメータ領域で調べ、それを無次元数で整理することを目指す研究を行うことにした。

2. 研究の目的

本研究では地震波の卓越周波数帯 (1-10 Hz 程度) に限定せず、幅広い周波数帯 (10-5000 Hz) で鉛直振動実験を行い、液状化が起きる振動条件を画像解析から制約し、その物理を無次元数を用いて理解することを目的とする。また同じ実験を間隙流体がより高粘性率の場合についてもを行い、流体の粘性率が液状化に与える影響について解明することも目的とする。

3. 研究の方法

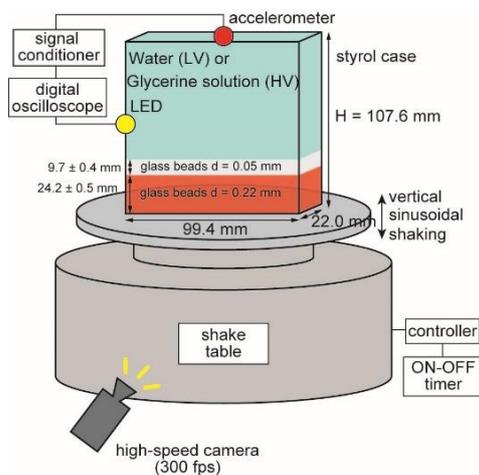


図1: 実験装置

本研究で用いた実験装置を図1に示す。粒子層の上層は細粒 ($d = 0.05 \text{ mm}$: 白粒)、下

層は粗粒 ($d = 0.22 \text{ mm}$: 赤粒)の球形のガラスビーズからなる。浸透率は粒径の2乗に比例するため、浅部は低浸透率層を形成する。実験セルを良くふった後に、粒子を堆積させると上記の級化構造が形成され、これを初期条件とした。セルを振動台に設置し、指定した加速度、周波数の組み合わせの下、5秒間鉛直振動させる。実験過程は高速カメラで撮影し、得られた画像から粒子層の2層境界、及び表面の時間変化を求める。同様の実験装置を間隙流体の粘性率が水の15倍のグリセリン水溶液を用いて作成し、同じ実験を行う。ただしこの場合は同一サイズの粒子の沈降速度が水の場合の1/17となるため、振動時間を17倍長くして実験を行い、振動後も17倍長い時間、測定を行なう。以下、液体が水の場合はLV (Low Viscosity) case、グリセリン水溶液の場合をHV (High Viscosity) caseと呼ぶ。

振動の加速度の範囲はLV (HV) case が $1.4\text{--}78.3$ ($0.43\text{--}40.9$) m/s^2 、周波数の範囲はいずれの場合も $10\text{--}5000 \text{ Hz}$ である。振動条件は3つの無次元数で特徴付けることができる。1つ目は加速度と液体中の実効的重力の比である無次元加速度 Γ である。 Γ はLV、HV case いずれもおおよそ $\Gamma = 0.1 - 10$ の範囲にある。2つ目は粒子1個分を自由落下する時間とストークス沈降する時間を比較したストークス数 (St) である。本実験では流体の粘性率が高いことと粒子サイズが小さいことから $St \sim 10^{-3}\text{--}10^{-1} \ll 1$ にある。この値は粒子が沈降する際には流体の粘性が支配的であることを示す。3つめはストークス沈降する時間と振動の周期を比較したViscous Number (Iv) である。本実験の範囲は $Iv = 0.1\text{--}1000$ 程度である。以上より本実験では $\Gamma = 1$ 、 $Iv = 1$ をはさむ範囲で実験を行っており、このため現象の遷移が見られることが期待できる。

4. 研究成果

(1) 低粘性率の場合 (LV case) の結果

振動の加速度が臨界値以上の場合の典型的な実験結果の例を図2に示す。 $t=0\text{s}$ において振動が開始した後、粒子層表面で噴砂が起き、同時に粒子層の2層境界が波状になり、その振幅が成長することが分かる。この波状のパターンは堆積物中に見られる火炎構造と呼ばれる構造と良く似ているため、私達も同じ名称で呼ぶことにした。振動停止後、火炎構造は粒子層に保存される。2層境界を画像解析によりトレースし、その振幅が時間と共に成長する様子を調べた結果を図3に示す。この図は縦軸が対数でとっており、振幅は最初は指数関数的に成長した後、 $t=4\text{s}$ あたりで成長が頭打ちになることが分かる。火炎構造は低浸透率層の下に間隙流体が貯留され、低密度層が形成された結果発生した、レイリー・テイラー型不安定と考えられる。ニュートン流体の場合について定式化された線形安定論を適用したところ、2層境界の下の厚さ1mm程

度の薄い層のみが流動化していること、また上層の実効的粘性率が2層境界下の流動化層の約120倍程度あると推定できた。

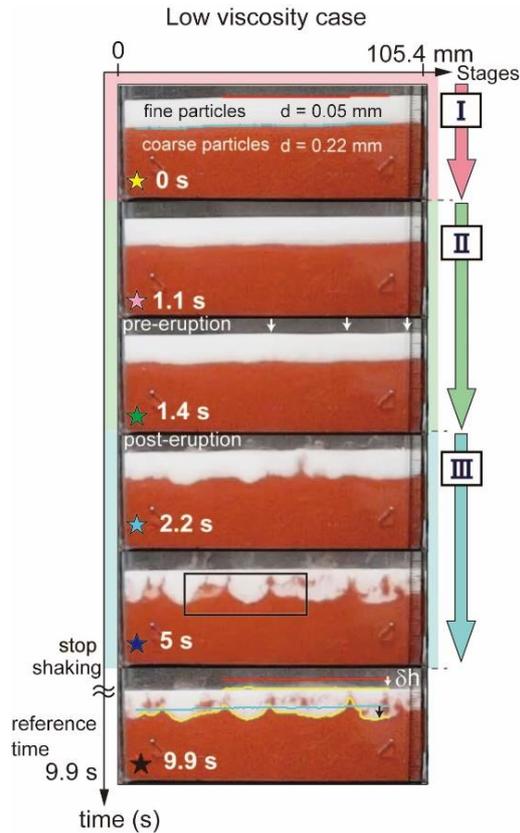


図2：液状化に伴う重力不安定の成長の例 (LV case)。加速度: 41 m/s^2 ($\Gamma=7$)、周波数: 40 Hz 。I、II、IIIは振幅の大きさに応じて場合分けした発達のステージを示す。

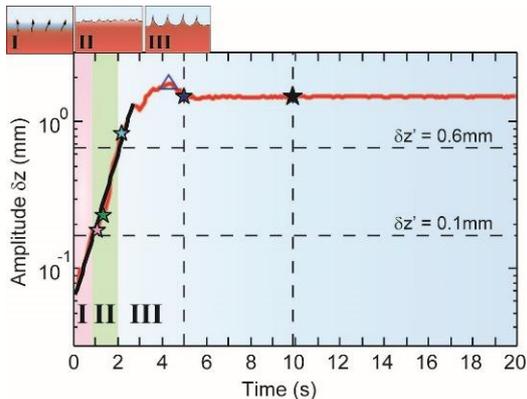


図3：図2の実験について2層境界における振幅成長の様子。

加速度、周波数の組み合わせを変えて実験を行い、実験結果を振幅の値に応じて3通りに場合分けした結果を図4に示す。この図では振幅の値が大きくなるに従い、レジームI、II、IIIで分類している。火炎構造が形成される場合はレジームIIIの場合に該当する、この図から火炎構造が形成されるための臨界加速度は約 100 Hz で最小となることが分かる。

振動のエネルギーは加速度²/周波数²でスケールされるため、一定加速度下では、高

周波数になる程、振動のエネルギーが小さい。一方で周波数が小さくなる程、振動の周期が長くなるため粒子が液状化することなく再配置できると考えられる。これは Viscous Number が小さくなることに相当する。

以上より一定加速度下では、高周波数、低周波数のいずれでも液状化が抑制されると解釈される。図4には 100 Hz における最小の臨界加速度 (黒点線) に加え、高周波数側の極限は臨界エネルギーに対応する無次元数である Shaking strength S (赤点線)、低周波数側の極限は Γ と I_v の積に対応する無次元 Jerk (青点線) の理論線を示している。これらの臨界線は火炎構造が出来る条件を良く説明している。

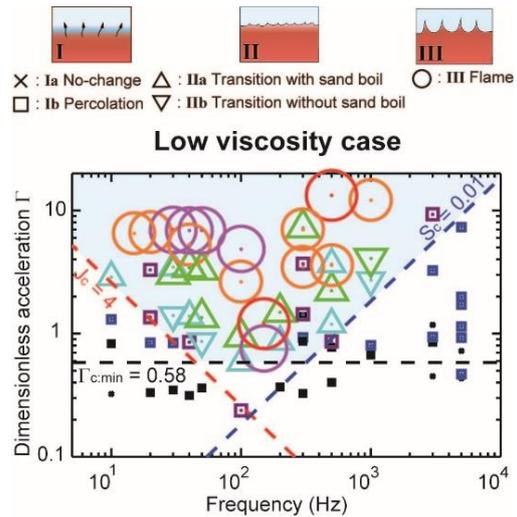


図4：火炎構造の振幅の加速度、周波数依存性

(2) 高粘性率の場合 (HV case) の結果

図5は液体の粘性率が水の15倍の場合の結果を示す。粘性率が大きくなると以下のような変化があることが分かる：(a) 火炎構造の波長が短くなり、重力不安定の成長率 ($1/\text{s}$) は、特徴的な時定数である粒径/ストークス沈降速度、でスケールするとむしろ LV case に比較して速くなる、(b) 火炎構造が形成されるための臨界加速度は LV case よりも小さくなる、(c) LV case よりも広い周波数帯で火炎構造が出来る (図6)。

粘性率が高い方が液状化しやすくなるのは粒子間の摩擦が液体により潤滑されたためと考えられる。そこで LV case 及び HV case と同じ液体に浸されたガラスビーズを周期的にせん断変形し、変形の歪を次第に大きくしていく実験を行なった。図7はその結果を示す。図7の上図の縦軸は摩擦の大きさに相当する。歪が大きくなるに伴い、摩擦が減少し、液状化することを示している。ここで空隙流体の粘性率が高い程 (赤印)、歪が同程度の時には摩擦が小さくなっていることがわかる。下図は応力と歪の位相差を示す。位相差 0 は弾性体 (固体的) であることに相当する。この図は位相差が大きくなるに伴い、流体的にな

ることが分かる。歪が同程度の下では、間隙流体の粘性率が高い程、流体的になることが分かる。以上より高粘性率の流体に浸された粒子程、摩擦が小さくなることが分かり、これが振動実験のLVとHV caseの違いの原因と理解される。

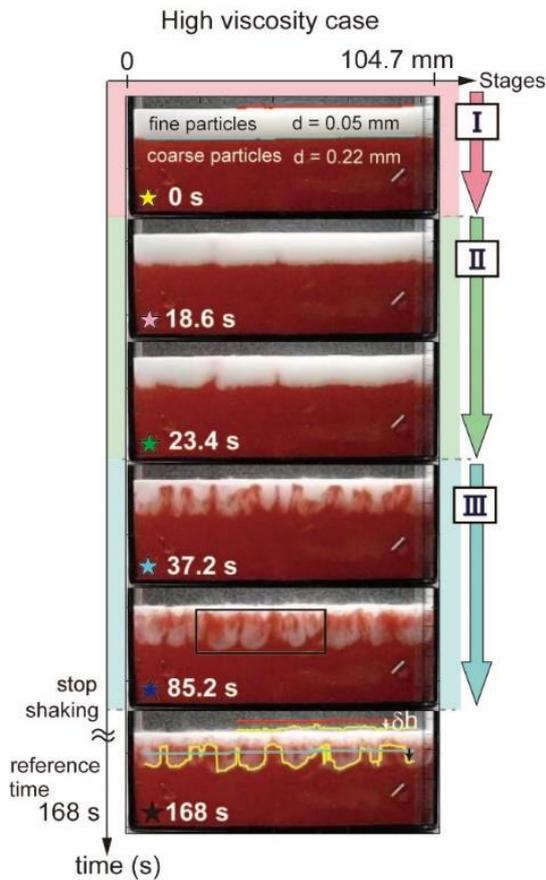


図5：液状化に伴う重力不安定の成長の例 (HV case)。加速度： 41 m/s^2 ($\Gamma=7$)、周波数：40 Hz。I、II、IIIは振幅の大きさに応じて場合わけした発達ステージを示す。

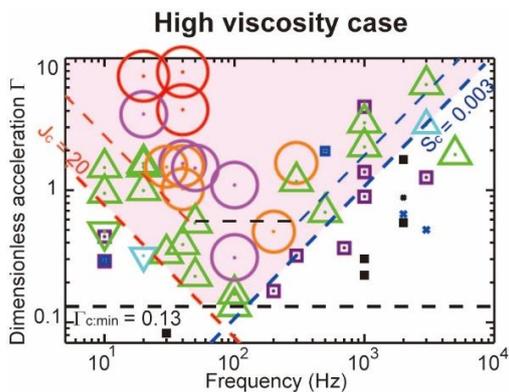


図6：HV caseの場合の火炎構造の振幅の加速度、周波数依存性。3つの太い線はHV caseの場合の臨界加速度を示す。比較のためLV caseの場合の3つの臨界加速度を細線で示した。

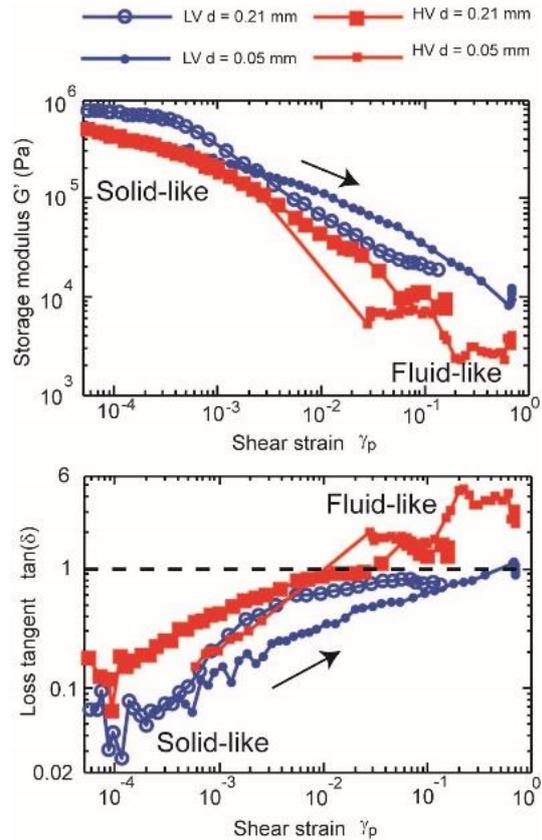


図7：液体に浸された粒子を周期的にせん断変形した実験の結果。この実験では100 Hzで周期的に水平方向に変形し、変形の歪を次第に大きくしている(矢印で示した)。上図は貯蔵弾性率(摩擦)、下図は応力と歪の位相差を示す。

(3) 地球科学的示唆

本実験から以下の示唆が得られた。(i) 液状化が起きるための条件は加速度ばかりでなく周波数に依存する。これは地震波の卓越周波数帯に応じて、液状化の臨界加速度が変わってくることを示している。(ii) 浅部に低浸透率層があり、重力不安定が起きると間隙流体が効率的に上部に向かって輸送される。圧密度から実効的浸透率を計算したところ、重力不安定が起きない場合に比べて浸透率が10倍になることが分かった。地震の後に浸透率が増大している観測事実があり、本実験は浅部に低浸透率層がある場合はこれが可能であることを示している。(iii) マグマ中のメルトが粒子間摩擦を潤滑することが出来れば液状化が起きやすくなる。

<引用文献>

- ① 安田奈央、2012、衝撃による液状化と流体輸送の実験的研究：浅部の低浸透率層の影響、金沢大学、卒業論文
- ② 山口他、2008、液状化に伴う噴砂と液状化層厚の関係、土木学会論文集C、64、79-89。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

① Yasuda, N. and I. Sumita, 2016, Effect of viscosity on the shaking-induced fluidization in a liquid-immersed granular medium, Phys. Rev. E., 93, 022901 (査読有)

② 隅田、安田、柴野、道岡、並木、2014、液体中における密に詰まった粉粒体の重力不安定、混相流、特集：粒子の流れ(1)、28(3)、304-311 (及び巻頭口絵) (査読なし)

③ Yasuda, N. and I. Sumita, 2014, Shaking conditions required for flame structure formation in a water-immersed granular medium, Progress Earth Planet Sci., 1:13 doi:10.1186/2197-4284-1-13, Springer Open (査読有)

[学会発表] (計13件)

① 水野、隅田、低浸透率層を含む二層系の液状化実験：層厚依存性、地球惑星科学連合大会、千葉、幕張、2016年5月22日

② 船屋、隅田、鉛直振動下における斜面崩壊の小型実験：間隙流体依存性、日本流体力学会、東工大、東京都目黒区、2015年、2015年9月27日

③ 船屋、隅田、鉛直振動下における斜面崩壊の小型実験、地球惑星科学連合大会、千葉県、幕張、2015年5月27日

④ 隅田、安田、鉛直加振下における粒子・液体系の流動化条件：粘性率依存性、地球惑星科学連合大会、千葉県、幕張、2015年5月28日

⑤ Yasuda, N. and I. Sumita, Shaking conditions required for a flame structure formation in a liquid-immersed granular medium, AOGS 2014, 北海道、札幌市、2014年7月31日

⑥ Yasuda, N. and I. Sumita, Laboratory experiment of liquefaction under vertical vibration: parameter dependence of the resulting instabilities, AGU Fall Meeting 2013, San Francisco, USA, 2013年、12月13日

⑦ Yasuda, N., and I. Sumita, A model experiment of liquefaction and fluid transport: quantifying the effect of permeability discontinuity, AGU Fall

Meeting 2013, San Francisco, USA, 2013年12月9日

⑧ 安田、隅田、鉛直加振による粉粒体・液体系の液状化と流体輸送の実験、日本惑星科学会、沖縄県、石垣市、2013年11月21日

⑨ 安田、隅田、鉛直加振による粉粒体・液体系の液状化と流体輸送の実験、日本流体力学会、東京農工大学、東京都、小金井、2013年9月12日

⑩ Yasuda, N. and I. Sumita, Experimental study of liquefaction and fluid transport: implication for triggered eruptions, IAVCEI 2013, 鹿児島県、鹿児島、2013年7月20日

⑪ 安田、隅田、鉛直加振による液状化と流体輸送の実験的研究、地球惑星科学連合大会、千葉県、幕張、2013年5月22日

⑫ 安田、隅田、鉛直加振による液状化と流体輸送の実験的研究：浅部に低浸透率層がある場合、日本惑星科学会、神戸大学、兵庫県、神戸市、2012年10月25日

⑬ 安田、隅田、衝撃による液状化と流体輸送の実験的研究：浅部の低浸透率層の影響、地球惑星科学連合大会、千葉県、幕張、2012年5月21日

[その他]

研究室のホームページ

<http://hakusan.s.kanazawa-u.ac.jp/~sumita>

実験動画集

<https://www.youtube.com/user/geodynlab>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

隅田育郎 (SUMITA, Ikuro)
金沢大学・理工研究域・准教授
研究者番号：90334747