

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400489

研究課題名(和文) 粒子配列を用いた液状化記録の解読手法

研究課題名(英文) Detecting historical record of seismic liquefaction by grain-fabric analysis

研究代表者

宮田 雄一郎 (MIYATA, Yuichiro)

山口大学・創成科学研究科・教授

研究者番号：60253134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：未固結の前弧海盆堆積物のうち、変形葉理を示すタービダイト砂層の粒子ファブリックは液状化実験の結果とも符合しており、液状化の痕跡とみなせることを裏付けている。しかし、そのような例は少なく、多くが初生構造を維持していた。固結した砂岩層では、液状化すれば体積収縮が起こって間隙率が低下することに注目し、600試料の間隙率を計測した。その結果、地域的に大きなばらつきを示し、砂岩層内の間隙率分布も不均一であった。そのため明確な液状化の痕跡を残す例は少ないことが示された。これらの砂層がプレート沈込み帯の海底表層で地震動を経験したと想定されるにもかかわらず、影響が検出されなかったことはむしろ注目に値する。

研究成果の概要(英文)：Grain-fabric of unconsolidated sandy turbidites of the forearc basin with contorted laminations coincided with those of liquefied beds. However, most of turbidites remained primary fabric without any trace of liquefaction. Seismic velocity and porosity of 600 consolidated sandstones were measured to detect grain packing due to liquefaction. As the results, porosity heterogeneity could not necessarily be explained by the liquefaction. Although most forearc-basin deposits possibly underwent seismic liquefaction at shallow subsurface of the subduction zone, only a few traces had been detected; that is rather puzzled.

研究分野：堆積学

キーワード：液状化 粒子ファブリック 間隙率

1. 研究開始当初の背景

砂層の液状化のほとんどは地震によって生じる。液状化を起こすような地震の長期記録(数千年以上)を解読するには、これまで砂層の流動変形や砂脈に頼る以外に有効な手段がなかった。プレート沈込み帯の前弧海盆堆積物には数10万年スケールの記録が残っており、液状化する砂層は多くがタービダイトとして堆積している。それらはおよそ1000年に一度の割合で堆積しているが、液状化した痕跡はまれにしか見られない。タービダイト砂層には弱い液状化しか経験しないものが含まれる可能性がある。水槽実験によると、液状化しても砂層に外力が加わらない限り、堆積構造は変形することなく維持される。このような肉眼的に識別できない液状化の痕跡は、粒子の再充填や回転変位といったファブリックに残されている可能性がある。申請者は、これまで粒子ファブリックの新しい計測方法を開発してきた。この手法を適用して上記の課題を検討できる可能性がある。

2. 研究の目的

今回は砂粒子の方位(粒子長軸の方位分布)から液状化の判定を行い、新たな判定基準とすることを目的としている。砂層の液状化が巨視的な変形を起こさない場合も、粒子の再配置に伴う粒子長軸方位の変化をもたらすためである。実験的にこのことを確かめた上で、地層記録の砂層の粒子組織を調査することで、沿岸地域および海底地盤における長期にわたる地震と液状化履歴の解読をめざす。

3. 研究の方法

粒子方位の計測は、これまで開発してきた方法を用いる。同時に水槽実験によって液状化による粒子方位分布の特徴を明らかにする。液状化以外の変形(とくに流動化)との違いを明らかにして、液状化・流動化による粒子の移動と回転を捉え、形成過程を明確にする。

(1)沖積層のボーリング試料、未固結の上総層群梅ヶ瀬層タービダイト砂層の連続サクセッションにおいて、堆積構造と粒子配向の関係を明らかにする；(2)砂層の堆積構造を維持した液状化は可能なのか、またそのときの粒子配向はどうなるのかを実験的に求める。(3)固結した固結した前弧海盆堆積物(中新統熊野層群など)について、変形構造と岩石物性との関係から液状化の痕跡を認定する。

粒子ファブリックの解析手順は、(1)砂層断面から樹脂を使って成形による乱れのない表層2mmまでを剥ぎ取る。(2)作色塗料でスプレー塗装する。(3)剥ぎ取り試料に直射照明を当て2000dpiで撮影する。(4)画像上で粒子を抽出し、粒径や長軸方位を計測する。(5)集計してマッピング表示、統計値を得る。

タービダイト砂層1m四方の場合、計測粒子数は1000万ほど、解析には数時間を要する。

4. 研究成果

上総層群梅ヶ瀬層の塊状タービダイト砂層の一部には、(1)コンポリユート葉理や(2)皿状構造、(3)ストロー状構造などの脱水構造の他に、(4)下位の泥層の破壊や(5)砂脈、(6)泥脈、(7)逆ロート状構造などの流体注入を示す変形がみられる。また泥層の最上部にも破壊構造が認められることがある。タービダイト層の多くは、帯磁率が下部ほど高いが、塊状均一であるため、肉眼でわかる変形構造は少ない。しかし、粒子ファブリックは、明確な面構造と40度におよぶ高角度のインプリケーションで特徴付けられる。帯磁率分布は、初生堆積構造を反映しているため、その乱れがあれば、何らかの変形や破壊が疑われる。そこで、変形した可能性の高い塊状タービダイト層について粒子ファブリックに着目して、砂層断面のはぎとり試料の写真から画像処理ソフトImageJおよび地理情報ソフトGMTを用いたファブリック解析を行い粒子組織で変形組織を可視化した。その結果、肉眼では全く確認することができない(F1)砂層最下部の部分的急傾斜組織、(F2)ランダム組織、(F3)水平組織、(F4)ブロック状組織、(F5)逆ロート状組織、(F6)脈状組織、(F7)流動褶曲組織、および(F8)皿状組織などの変形組織が数mの範囲に限って可視化検出された。これらの変形組織は帯磁率分布に対応していた。肉眼的に認められる上記(1)~(7)の変形構造と併せると、このような変形組織・構造は層厚200mの区間で、限られた層準においてその多くが単一の砂層内(最大でも高さ10m以内)、幅数mの範囲に部分的に分布しており、側方延長部には変形の痕跡が少ない。この特徴は、上部ほど変形が顕著で側方に均一な液状化変形の特徴とは異なっている。液状化実験によると砂層の上部ほど粒子長軸方位が大きく分散するが、外力が作用しない限り上下方向の相互貫入や流動は生じなかった。

梅ヶ瀬層の砂層については液状化と判断できる変形は確認されなかった。しかし解析できた砂層の数がまだ少ない。その一方で、流動変形を示すファブリックは予想以上に多く、しかも液状化以外の原因が示唆された。その実態解明は新たに追加すべき検討課題である。したがって計画以上の成果があったと言えるが、新たな課題が加わった結果、計画の修正を要する。ファブリックの乱れを検出できた砂層の層序的位置については、特定の層準に集中するという明確な傾向は見いだせていない。

利根川河口域のボーリング試料で見出された例のように、未変形の部分でもファブリックの乱れが一部で確認されたことは、肉眼や軟X線では液状化をすべて認定できない可能性を示している。この点は計画以上の成果

ということができ、継続して追求すべき点と考えている。ただし、掘削時の乱れの影響もみられ問題が残った。

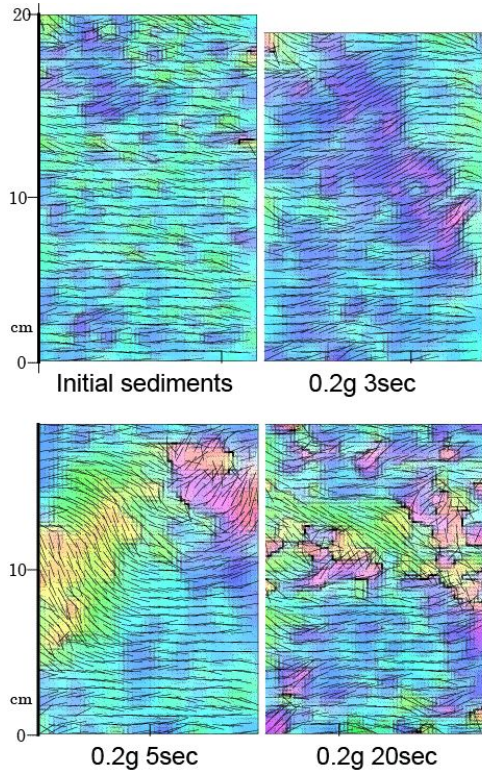


図1 液状化実験による粒子ファブリックの変化。色相は粒子長軸の平均方位を、彩度とベクトル長は方位の集中率を示す

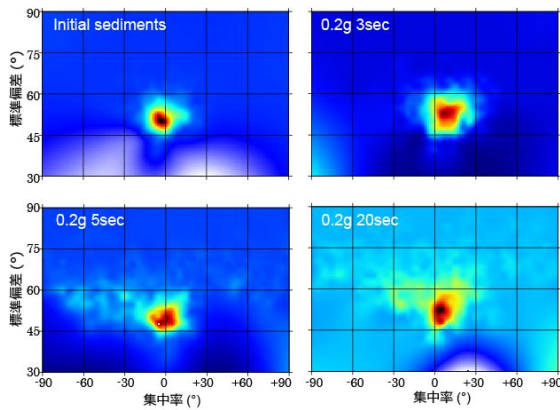


図2 長軸方位とその集中率の関係を示すダイアグラム。赤いほどその方位分布を示す部分が多いことを示す。データは図1と同じ。

液状化の水槽実験は、砂層の充填様式と振動加速度について程度の異なる液状化を再現した。箱形水槽に砂を均一に沈降堆積させ、モーターや手動で左右に振動を与えることで液状化を起こした場合、水槽の側壁部では、砂層が膨張と圧縮が交互に加わることになる。その粒子配向を剥ぎ取り試料から測定すると、水槽全体の内、側壁から約20-30%の範囲において、堆積構造としての葉理が極端に

褶曲し、液状化を再現するにあたり問題となった。そこで、箱形的水槽ではなく円筒型的水槽を用いて実験を行った。円筒型水槽を左右に回転させ繰り返しのせん断を加えても、砂は筒の中で回転するため箱形水槽のような側壁による大きな影響を受けにくい。繰り返しせん断の回数異なる砂層について、粒子ファブリックを求めると図1,2のようになった。すなわち、(1)初期状態は沈降堆積のみなので、粒子は全体的に水平方向が卓越しており、粒子の長軸方位集分布の標準偏差をとると45°程度であり、分布に乱れは見られない。(2)約3秒間振幅0.2gの応力を加えた場合、肉眼的には流動変形はみられない。粒子ファブリックはせん断により中上部はやや歪んでいるが、全体的に水平方向に集中率が上昇した。粒度別にみると粗粒子(0-2)側にその傾向が強い。一方細粒子(2-3.5)は集中が悪く、傾方位分布がやや分散した。(3)約5秒間振幅0.2gの応力を加えたもので、肉眼的には流動変形はみられない。粒子ファブリックはせん断により中上部は歪んでいる。全体的に水平方向に集中率の標準偏差は5°程度上昇した。粒度別にみると粗粒子(0-2)側にその傾向が強い。一方細粒子(2-3.5)は集中が悪く、方位分布がやや分散した。(4)約20秒間振幅0.2gの応力を加えたもので、砂層は完全に液状化を終えるが肉眼的には流動変形はみられない。粒子ファブリックはせん断により中上部はやや歪んでいるが、全体的に水平方向に集中率が上昇し下限が標準偏差で80°まで達している。粒度別にみると粗粒子(0-2)側にその傾向が強い。一方細粒子(2-3.5)は集中が悪く、方位分布が大きくばらけた。液状化を段階的にみると、液状化が進行するにつれ下部では粒子長軸は水平方向が卓越し、方位分布の集中が増す傾向があることがわかる。一方で上部では粒子の方位分布が分散した。液状化層は下部から上部に向かって粒子の長軸分布が分散する傾向が確認された。この結果は、流動変形の見られない砂層に液状化の痕跡を見出す指標を与えるものといえる。

千葉県更新統上総層群では顕著なコンポルト葉理を示すタービダイト砂層は液状化実験の結果とも符合しており、液状化の痕跡とみなすことができる。しかし、そのような砂層は稀であって多くの砂層は未変形で、初生堆積構造を維持していた。一方で、梅ヶ瀬層の塊状タービダイト砂層の一部にしばしばみられた流動変形は、液状化変形の特徴も粒子ファブリックも示していない。これらは、その分布や内部構造からみて流体注入が疑われた。流体として水のほかガス、およびそれら両者を砂層に注入する実験を行ったところ、類似した破壊構造を再現することができた。流体注入の原因としてはガスハイドレートの分解が強く示唆される。

一方で、固結した砂岩層に対してははぎ取

り試料を用いたファブリック解析手法が使えない。液状化によって脱水・再堆積が起こると間隙率の減少は 10%を超える場合も少なくない。和歌山県四万十帯の固結した中新統前弧海盆堆積物（田辺層群・熊野層群）について、砂岩の岩石物性を測定した。P 波・S 波速度、かさ密度、粒子密度、間隙率を約 600 試料について計測したところ、これらは地域的に大きなばらつきを示し、近い層準でも大きく異なるばかりか、同一砂岩層でも側方にメートル単位で数 10%も異なっていた。しかし、弾性波速度は間隙率とともに変化し互いに高い相関を示す。すなわち、砂岩層内の間隙率分布が不均一であることを意味している。一部に、液状化によるコンポリュート葉理を示す砂岩層があり、同等の P 波速度をもつ他の砂岩より間隙率が低かった。これは振動による粒子の再充填（脱水・収縮）の結果と思われる。しかし、間隙率の違いは粒度分布や続成鉱物の充填にも左右され、液状化に起因する部分を抽出するには問題となる。各物性値間の相関を検討したところ、熊野層群砂岩では粒子密度の低い砂岩ほど間隙率が低い（従って弾性波速度が高い）傾向がみられ、粒度とは無関係であった。この結果は液状化に起因する可能性も考えられ、さらに検討を要する。以上のことから、海洋プレート沈込み帯で形成された前弧海盆堆積物の砂層・砂岩層であっても、明確な液状化の痕跡をもった層は少ないことがわかった。堆積速度からみてほぼ全ての砂層が海底表層で地震動を経験していると想定されるにもかかわらず、このような結果になったことは注目し値する。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 1 件)

日南海岸沿いの深海堆積相と重力流堆積物 石原 与四郎, 清水 康博, 松本 弾, 宮田 雄一郎, 査読有, 地質学雑誌 Vol. 120, 2014, S41-S62.

〔学会発表〕(計 11 件)

宮田 雄一郎・末弘 美咲, 2016 年 9 月 12 日, 粒子形状と方位の 3D 計測およびその堆積学への利用例. 日本地質学会第 123 年学術大会, 日本大学(東京都世田谷区).
宮田 雄一郎・花本 夏輝, 2016 年 3 月 6 日, 写真画像を用いた 3D 砂粒子ファブリックの計測. 日本堆積学会 2016 年福岡大会福岡大学(福岡県福岡市).
潮崎翔一・宮田 雄一郎, 2015 年 9 月 12 日, 礫ファブリックからみた含礫泥岩メランジュの形成様式. 日本地質学会第 122 年学術大会, 信州大学(長野県長野市).
宮田 雄一郎・松山 優, 2015 年 9 月 13 日, 塊状タービダイト砂層の粒子ファブリック

クから 可視化されたメートルスケールのベッドフォーム. 日本地質学会第 122 年学術大会, 信州大学(長野県長野市).
田中恭平・宮原玲奈・宮田 雄一郎, 2015 年 3 月 25 日, Dish structure をもつ砂層の粒子組織と破壊様式. 日本堆積学会 2015 年つくば大会, 筑波大学(茨城県つくば市).

宮田 雄一郎・下梶 秀則, 2015 年 3 月 25 日, 新しい粒子ファブリックのマッピング方法と塊状タービダイト砂層の内部堆積構造. 日本堆積学会 2015 年つくば大会, 筑波大学(茨城県つくば市).

宮原 玲奈・宮田 雄一郎, 2015 年 2 月 21 日, Dish structure の粒子ファブリック. 日本地質学会西日本支部 第 166 回例会, 福岡大学(福岡県福岡市).

下梶 秀則・宮田 雄一郎, 2015 年 2 月 21 日, 粒子組織からみた塊状タービダイト砂層の内部堆積構造. 日本地質学会西日本支部第 166 回例会, 福岡大学(福岡県福岡市).

下梶 秀則・宮田 雄一郎, 2014 年 9 月 14 日, 高精度粒子ファブリックマップが示す塊状タービダイト砂層の内部成層構造. 日本地質学会第 121 年学術大会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

宮田 雄一郎・下梶 秀則・田中 恭平, 2014 年 9 月 14 日, デジタルカメラ画像を用いた砂層断面の粒子ファブリック解析. 日本地質学会第 121 年学術大会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

田中恭平・宮田 雄一郎, 2014 年 9 月 14 日, 粒子ファブリックからみた塊状タービダイト砂層の部分的な流動変形. 日本地質学会第 121 年学術大会, 鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).

〔図書〕(計 1 件)

Ysufumi Iryu, Yuichiro Miyata, Natsue Abe, Shoji Arai, Masahiro Chigira, Masayuki Ehiro, Wes Gibbons, Akira Hasegawa, Yoshutaka Hashimoto, Yasutaka Hasegawa, Yoshikuni Hiroi, Yoshitaka Hiroki, Ken Ikehara, Teruyoshi Imaoka, Satoko Ishimaru, 2016, Geology of Japan (Seismic Liquefaction の章を分担), Geological Society, London, 522p(475-478)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮田 雄一郎 (MIYATA Yuichiro)
山口大学・創成科学研究科・教授
研究者番号: 60253134

(4) 研究協力者

田中 恭平 (TANAKA Kyohei)
下梶 秀則 (SHIMOKAJI Hidenori)