

液状化 – 流動化した層準と地質構造 —メカニズム解明にもとづいた対策方法の検討を 視野に入れた地質調査の例—

風岡 修¹⁾

1. はじめに

日本列島は環太平洋造山帯に位置し、地震や火山活動などの地殻変動が著しく、世界でもまれなほど様々な地質から構成されている。このような多様な地質の上に暮らしている我々は、毎年のように様々な災害に遭遇している。災害は人間の暮らしが自然現象により損害を受けることである。自然現象が過去と変わりがなくても暮らし方（社会システム）が変われば損害になることもあれば恵みになることもある。かつて洪水は農地に肥沃な土壌をもたらす歓迎されていた。自然現象を調査から予測し、これに基づき暮らし方を変えることも災害予防上必要なことであろう。

千葉県地質環境研究室は発足当時から、国連の1972年人間環境宣言や1992年リオ宣言の考え方を積極的に地質環境分野に導入し、大地や地下流体資源の持続的利用を目標に研究を進めている。以下に、液状化 – 流動化現象に関する取り組みを紹介する。

2. 液状化 – 流動化に関する東日本大震災までの取組み

本研究室は、1970年に千葉県内で発生していた深刻な地盤の沈下・地下水枯渇に関する調査研究事業を進めるため、千葉県公害研究所に地盤沈下研究室として設置されスタートした。その後1977年より、地震とその災害を含む地盤運動に関する調査研究を始め、1978年宮城県沖地震時より地震時の液状化に関する調査研究に取り組み始め、地波現象の存在を明らかにした（楡井ほか、1986）。

1987年千葉県東方沖地震（以下「千葉東方沖地震」と略す）時には、千葉県内に広く分布する埋立地に多数の液状化 – 流動化現象がみられ、その分布や噴砂、地表の変形を詳細に調べ（Nirei *et al.*, 1990）、これを基に噴砂地点において調査を行い、後に述べるメカニズムのほか、①地中壁が地下水流動を阻害し、この上流側では壁に沿って液状

化 – 流動化していること（風岡、2003）、②沖積層の厚い部分で地震動が増幅し液状化 – 流動化現象が発生していること（風岡ほか、2010など）などが明らかとなってきた。

また、この後の地震でも液状化 – 流動化が発生する強震時には現地調査を行い、新たな現象をみつけている。

1993年釧路沖地震、1994年北海道東方沖地震、1993年北海道南西沖地震、2003年十勝沖地震、2003年宮城県沖地震時には第四紀火山碎屑物の多くが液状化 – 流動化しやすいこと、再液状化 – 流動化など明らかとなった（千葉県地質環境研究室・液状化防止技術研究会、1993；楡井ほか、1993；風岡ほか、2003；楠田ほか、2004など）。

1995年兵庫県南部地震時には、明石市～尼崎市の埋立地を中心に現地調査を行い、沖積層の軟弱な粘土層の厚い部分に建つ木造家屋の多くは倒壊した（田結庄、1995）ものの、隣接した埋立地では液状化 – 流動化により家は若干傾いたものの揺れは小さく、液状化 – 流動化現象は剪断波の減衰といった正の側面の可能性と噴レキ現象（楡井ほか、1995）がみつかった。

2004年新潟県中越地震・2007年新潟県中越沖地震では、1964年新潟地震時に液状化 – 流動化がみられた刈羽村～柏崎市の海岸に分布する新砂丘の内陸側斜面下部における再液状化 – 流動化、数か月以上にもわたる沈下の継続、暗渠排水の液状化の予防効果などが明らかとなった（風岡ほか、2008など）。以上のような調査の積み重ねが、東日本大震災ではスムーズな調査につながった。

3. これまでに明らかになってきた液状化 – 流動化メカニズム

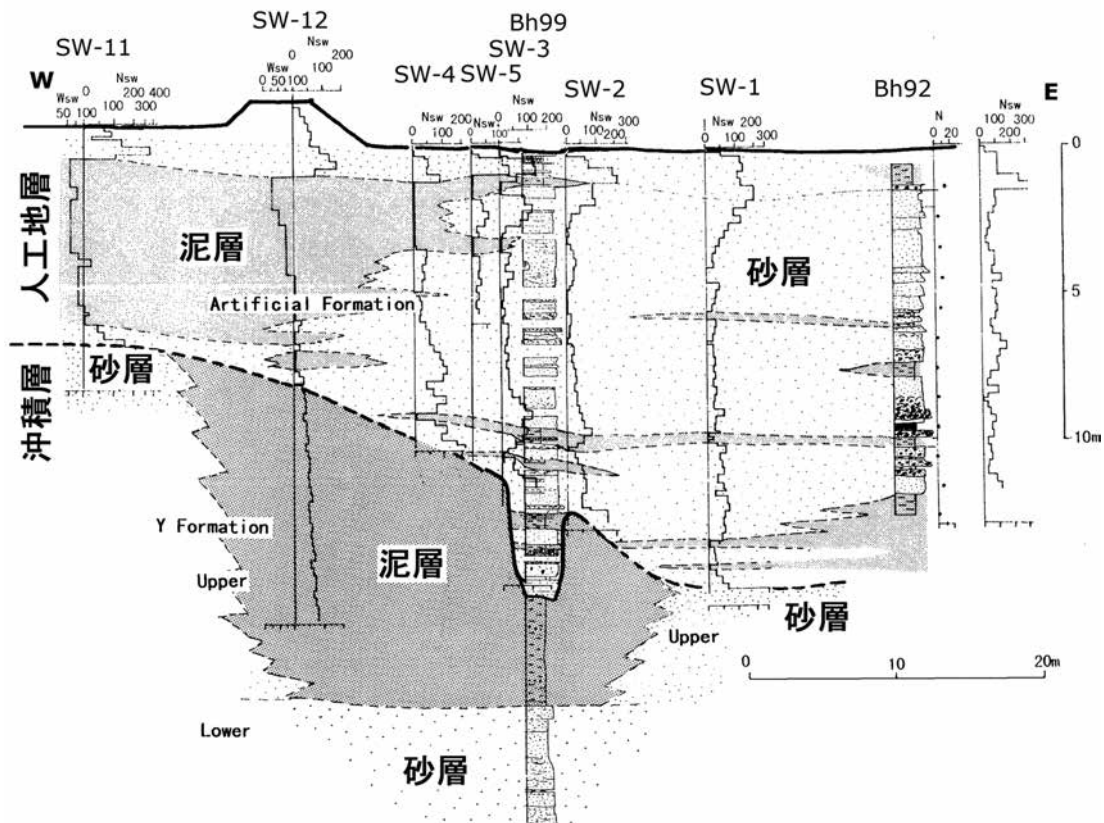
千葉東方沖地震時に液状化 – 流動化現象が発生した場所でのメカニズム解明例を以下に紹介する。

3.1 液状化 – 流動化の基本メカニズムの解明例

千葉東方沖地震時に香取市石納^{こくのう}で生じた巨大噴砂の一つ

1) 千葉県環境研究センター 地質環境研究室

キーワード：液状化 – 流動化、強震動、人工地層、沖積層



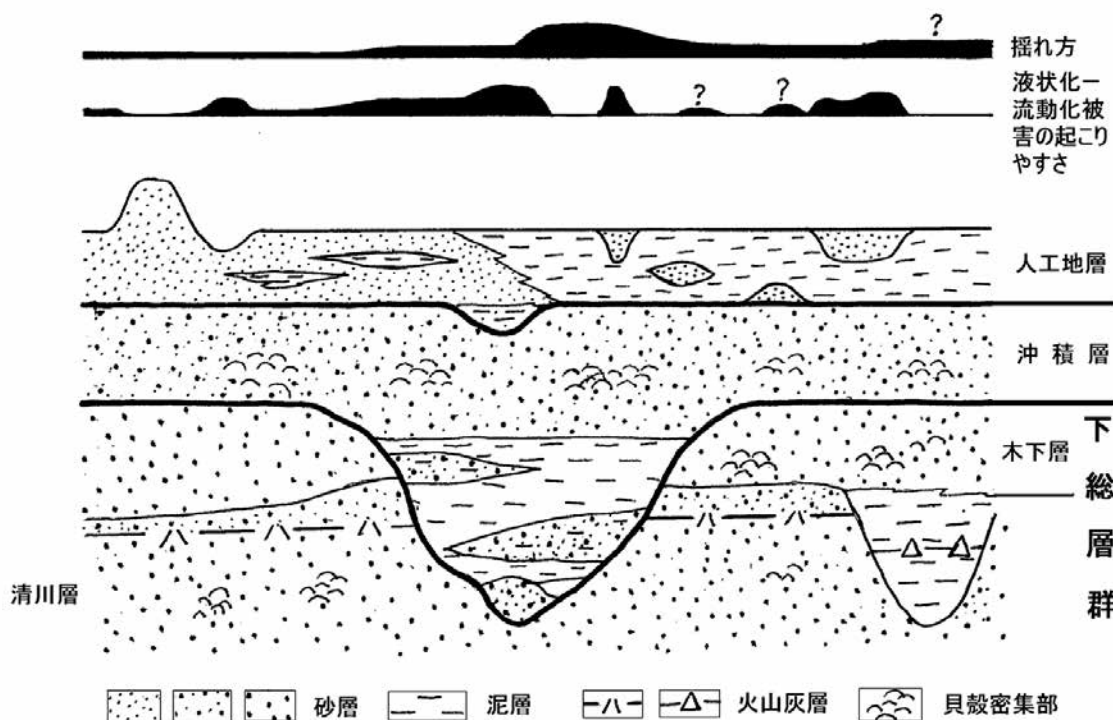
第1図 千葉市美浜区中磯辺公園の地質断面 (風岡ほか, 2000 に加筆). Bhはオールコアボーリングのデータ. SWはスウェーデン式サウンディング試験のデータ.

において、地下水位を下げトレンチ調査を実施することにより、地下を乱さずに地層の状態を観察することができ、はじめて地中での液状化の実態がわかり、液状化-流動化現象の発生～終了の過程が明らかとなった。以下に順をおってその過程を述べる。なお、図は風岡(2003)の図2.6 (http://www.kubota.co.jp/siryuu/pr/urban/pdf/40/pdf/2_3.pdf 2013/10/17 確認)を参照いただきたい。

①地震が起き、人工地層中の水圧が上昇し、地下水位が地表近くまで上昇すると、斑点状に部分的な液状化が始まり、その部分の地層のラミナが消え始める。②水位が地表を超え、液状化部分が急速に拡大し、側方につながり、地層粒子が動けるようになり、地面が波打ち始める(地波現象の発生)。③波頭の一部に亀裂が生じ、そこから液状化した地下水と砂が地表に噴出し始め、液状化部分の流動化が始まり、埋立層下部からも上方へ流動していき、地層は擾乱され緩くなる。④噴出孔付近ではジェット噴流のように、その中央部では上昇流が、縁では下降流が生じ、噴砂孔が周囲へ拡大していく。⑤地下水の流出などによる地下水位の減少に伴い噴水は終了していく。また、流動した部分の多くはゆる詰まりのままとなる。

3.2 液状化-流動化しやすい人工地層の地質構造

東京湾岸埋立地である千葉市美浜区の中磯辺公園では、千葉東方沖地震時に噴砂が直線状に並んだ。この原因を探るため、これに直交する測線上で複数のオールコアボーリングとスウェーデン式サウンディング試験を数m間隔に行う詳細な地質調査を行った(第1図)。先のトレンチ調査で明らかとなったように、地層の断面観察によりはじめてどこが液状化-流動化したのかが判断できる。このため、オールコアボーリングを選定し、乱さないよう工夫をして地層試料を採取し、コアの地層断面を観察した。なお、貫入試験は簡易的な調査であり地層の連続性を確認する意味で行うものであり、この貫入試験だけでは液状化-流動化部分の判定は不可能である。調査の結果、サンドポンプ工法による埋立層には、砂層や泥層の発達部分が存在し、砂層を泥層が楔状に覆っており、このうちの砂層の最上部付近で液状化-流動化し、この境界に沿って噴砂が生じていることが明らかとなった(風岡ほか, 2000)。同様な現象は同地震の際の長南中学校の谷埋めの盛土部分(香村, 2003)、2000年鳥取県西部地震での沿岸埋立地の竹内工業団地(風岡ほか, 2001)でもみられ、同様な地質構造となっていた。



第2図 東京湾岸埋立地の地質構造と地震動・液状化－流動化被害との概念図。地表のそれぞれの地点での揺れ方・液状化－流動化被害の起こりやすさを太さで示した。太いほどその強度が大きい（風岡，2011）。

4. 東日本大震災以降の取組み

2011年3月11日14時46分頃の本震および15時15分の最大余震発生時には、本研究室の室員はそれぞれ東京湾岸埋立地の異なる場所で液状化－流動化現象を偶然にも体験した。その後東京湾岸埋立地の状況を把握し、当日の夜に翌日からの調査計画を立て、12日からは2人1組3班集体で、分布と被害状況の把握のため現地実態調査を開始し、2011年3月18日には東京湾岸埋立地の調査結果（第1報）を、4月15日に第2報、6月9日に第3報、12月28日に第4報、2012年8月30日に第5報を公表しウェブ上にも掲載した。これまでの調査結果（千葉県環境研究センター，2011a, b, c, d, 2012）の概要を以下に示す。

4.1 房総半島全域での液状化－流動化現象の特徴

①人工地層（埋立層・盛土層など）分布域を中心に、震度5強以上に揺れたところで液状化－流動化現象がみられた。②千葉東方沖地震時に液状化－流動化が起こったところで今回震度5強以上に揺れたところでは再液状化－流動化がみられた。なお、今回の方が規模・被害程度が非

常に大きく、数十cmもの地盤の沈下や構造物の地中への沈み込み、ライフラインの寸断が多数みられた。③噴水量が多く、広い範囲で冠水した。

4.2 東京湾岸埋立地の液状化－流動化現象の特徴

①埋立地全域で一様に液状化－流動化現象が起こっておらず、場所により被害程度が大きく異なる。②著しい液状化－流動化現象は10～50m程度の範囲に斑状に分布し、10～50cmもの地表面の沈下がみられた。また、一部で波長10～100m・振幅10～40cm程度の地波現象もみられた。③著しい液状化－流動化現象の斑点は幅500m程度で北東－南西方向に延びる数本の帯状に分布した。なお、この帯の一部では千葉東方沖地震時にも噴砂が分布しており、繰り返し起こる現象であるといえよう。④液状化防止対策を施したところを除けば、人工地層・沖積層の厚さなどの浅層の地質構造と液状化－流動化現象の分布に相関がみられる。すなわち、液状化－流動化現象の斑状分布については、千葉市美浜区の中磯辺公園の一角でみられるように、人工地層が主に砂層で構成されているところで見られ、泥層で構成されているところではほとんどみられない（風岡，2011）。JR京葉線よりも海側で被害程度が大

きく、被害程度は埋立層の厚さと調和的である。さらに被害は海岸線に直交～やや斜交する幅約 500 m の帯状に集中し、沖積層の厚さと調和的である（風岡，2011）。⑤噴水・噴砂量が多く、砂が下水や側溝に流れ込み詰まりを生じた。⑥比高の高い盛土地では、比高約 2 m 以下の部分にのみ噴砂がみられ、地下水面がこの位置まで上昇したものと推定される。⑦建造物の縁や角・電柱の脇から噴砂が出ている場合が多い。⑧著しい液状化－流動化現象のあったところでは、強い揺れを感じなかったり、家の中の家具等は倒れなかったとの証言が多く、S 波の減衰が生じたものと思われる。

4.3 東京湾岸埋立地における液状化－流動化現象と地質構造についての予察

上記までの液状化－流動化の分布状況や既存データより、現時点での液状化－流動化現象と地質構造についてまとめてみたのが第 2 図である。地層断面は海岸に平行な方向で、ここに地震時の揺れの強さ・液状化－流動化被害の強さを概念的に示したものである。埋立層の下位には沖積層（最終氷期以降の新しい柔らかな地層）があり、上部更新統の下総層群を谷状に削り込んで帯状に分布する。これら谷の幅は数百 m で、沖積層は軟らかいので地震動が増幅しやすいことから、液状化－流動化現象が幅 500 m 程のこの帯に集中したものと考えられる。なお、地質環境研究室はこの帯の中に位置し、5 強の揺れが観測された。また、下総層群中に存在する中部更新統上部の木下層の谷埋め堆積物（下総台地研究グループ，1984）上でも強く揺れる可能性がある。この沖積層の上にある人工地層は 1960 年代～1980 年代初期に砂や泥で構成される東京湾底（海上保安庁，2010）の浚渫物を母材にサンドポンプ工法によりつくられ、サンドポンプの噴出口付近には粗い砂が、遠くには泥が堆積するとともに噴出口の位置も変わるから、この埋立地には砂層や泥層の卓越部がそれぞれ存在することになった（風岡，2003）。液状化－流動化現象は、人工地層の砂層分布域に起こりやすく、中でもこの砂層の上に楔状に泥層が重なる部分は特に起こりやすいと思われる（風岡ほか，2000）。また、地下水位との関係で水位が浅くなる標高の低いところでは起こりやすく、高いところは起こりにくい。多くの泥層は粘着力のある粘土鉱物を多く含むため、この現象は起こりにくい。

4.4 東京湾岸埋立地の液状化－流動化被害の予防・軽減

これまでの議論をもとに、今後の調査や対策に向けて地質環境の視点からの考慮すべき点を記す。①調査には複数のオールコアボーリングを行い、液状化－流動化部分を認定し、地層を対比し、透水層区分・層序区分を行い、地質断面図を作成し、地下水の流動に基づいた液状化－流動化のメカニズムを解き明かすことが必要である。これによりはじめて、液状化－流動化の予防方法の検討と積み上げが可能な予防計画の設計が可能となる。②液状化－流動化部分の判定には、乱さず連続的に採取した地層試料が必要で、観察者は地層の初生的構造の認定が可能な者である必要がある。地層対比・透水層区分・層序区分を明らかにするには、国内の丘陵や山地に分布する第四紀層の地質図を自らの地質踏査によって作成したことのある経験者であることが必要となる。③上記のような方法で、今回の地震により液状化－流動化が斑状にみられた箇所について調べてみると、液状化－流動化部分は人工地層内のある特定の層準にみられる傾向が明らかになりつつある（風岡ほか，2012，2013）。④東京湾岸埋立地では、様々な有害物質が取り扱われており、このような場所での液状化－流動化の予防対策は、有害物質の深部拡散の防止のため、調査・対策では透水層単元を考慮し、難透水層の止水能力を損なわないように行う必要がある。

文 献

- 千葉県地質環境研究室・液状化防止技術研究会（1993）
1993 年釧路沖地震による地質災害調査（概要）。千葉県環境地質研究，24，1-37。
- 千葉県環境研究センター（2011a）平成 23（2011）年東北地方太平洋沖地震による東京湾岸埋立地での液状化－流動化被害（第 1 報）。千葉県環境研究センター 調査研究報告，G-8，1-1-1-8。
- 千葉県環境研究センター（2011b）平成 23（2011）年東北地方太平洋沖地震における千葉県内の液状化－流動化被害（第 2 報）。千葉県環境研究センター 調査研究報告，G-8，2-1-2-57。
- 千葉県環境研究センター（2011c）千葉県内の液状化－流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果（第 3 報）－浦安地区（1）－。千葉県環境研究センター 調査研究報告，G-8，3-1-3-25。
- 千葉県環境研究センター（2011d）千葉県内の液状化－流動化現象とその被害の概要及び詳細分布調査結果（第 4 報）。千葉県環境研究センター 調査研究報告，G-8，

- 4-1-4-69.
千葉県環境研究センター（2012）平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震による液状化－流動化現象と詳細分布調査結果（第5報）. 千葉県環境研究センター調査研究報告, G-8, 5-1-5-8.
- 海上保安庁（2010）航海用海図「東京湾北部」1:50,000.
- 香村一夫（2003）内陸の造成地. アーバンクボタ, no. 40, 12-14.
- 風岡 修（2003）利根川下流低地・東京湾岸埋立地. アーバンクボタ, no. 40, 5-13.
- 風岡 修（2011）人工地層のでき方と液状化－流動化被害. シンポジウム「人工改変地と東日本大震災」資料集, 地質汚染－医療地質－社会地質学会, 1-21.
- 風岡 修・佐藤光男・楠田 隆・香村一夫・風戸孝之・香川 淳・森崎正昭・佐藤賢司・古野邦雄・酒井 豊・加藤晶子・楡井 久（2000）局所的な表層地質の違いが液状化－流動化に与える影響. 第10回環境地質学シンポジウム論文集, 33-38.
- 風岡 修・楠田 隆・古野邦雄・楡井 久・井内美郎・山内靖喜・矢野孝雄・小玉芳敬・奈良正和・赤石美和・井上卓彦・大平 亮・三井拓也・岩本直哉・香川 淳・石渡康尊・下田順子・皆藤由美（2001）地震時に見られた液状化－流動化現象とその時系列変化. 第11回環境地質学シンポジウム論文集, 419-424.
- 風岡 修・楠田 隆・古橋優剛・吉田 剛（2003）2003年宮城県沖地震及び宮城県北部地震時に崩壊した斜面の盛土層の液状化強度, 第13回環境地質学シンポジウム論文集, 457-462.
- 風岡 修・川辺孝幸・古野邦雄・笠原 豊・岸 沙織・黒木 渉・楠田 隆・奥山明洋・酒井 豊・高藻真理・竹内敦実・宇留野元徳・渡辺真弓・吉田 剛（2008）2007年中越沖地震の際の液状化－流動化被害調査結果. 第17回環境地質学シンポジウム論文集, 29-34.
- 風岡 修・佐藤光男・大沢裕之・吉田 剛・古野邦雄・楠田 隆・香川 淳・酒井 豊・原 雄・香村一夫・佐藤賢司・楡井 久（2010）完新統海岸砂丘の砂丘間低地における液状化－流動化現象の機構解明と今後の強震動・被害予測上の問題点. 第20回環境地質学シンポジウム論文集, 291-296.
- 風岡 修・古野邦雄・香川 淳・楠田 隆・酒井 豊・吉田 剛・加藤晶子・山本真理・堀井義久・麻生 等・佐藤光男・高梨祐司（2012）2011年東北地方太平洋沖地震での東京湾岸埋立地における液状化－流動化現象. 第22回環境地質学シンポジウム論文集, 161-166.
- 風岡 修・佐藤光男・野崎真司・森崎正昭・吉田 剛・堀井義久・古野邦雄・香川 淳・楠田 隆・酒井 豊・木村満男・岡部隆男（2013）東京湾岸埋立地千葉県美浜区稲毛海浜公園における人工地層の層序と2011年東北地方太平洋沖地震による液状化－流動化層準. 日本地質学会第120年学術大会講演要旨, 146.
- 楠田 隆・風岡 修・楡井 久・大脇正人・香川 淳（2004）2003年十勝沖地震による地質環境被害. 第14回環境地質学シンポジウム論文集, 391-394.
- 楡井 久・佐藤賢司・古野邦雄・高梨裕司・森 範幸（1986）地震時における地波現象と帯水層の液状化. 地質学論集, no. 27, 109-114.
- Nirei, H., Kusuda, T., Suzuki, K., Kamura, K., Furuno, K., Hara, Y., Satoh, K. and Kazaoka, O. (1990) The 1987 East off Chiba Prefecture Earthquake and its hazard. *Mem. Geol. Soc. Japan*, no. 35, 31-46.
- 楡井 久・楠田 隆・香村一夫・風岡 修・森崎正昭・香川 淳・夏坂幸彦・中西 清・木村哲二（1993）火山性岩屑なだれ堆積物の液状化・流動化現象について. 第3回環境地質学シンポジウム論文集, 397-402.
- 楡井 久・楠田 隆・古野邦雄・佐藤賢司・酒井 豊・香村一夫・風岡 修・森崎正昭・香川 淳（1995）阪神・淡路大震災での液状化・流動化被害（概報）. 都市耐震センター研究報告, 京都大学防災研究所, no. 9, 25-52.
- 下総台地研究グループ（1984）千葉県手賀沼周辺地域における木下層基底の形態と層相の関係. 地球科学, 38, 226-234.
- 田結庄良昭（1995）神戸長田地域の地震災害と地質・地盤との関係. シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, 日本地質学会環境地質研究委員会, 149-154.

（受付：2013年10月17日）