

GSJ 地質ニュース

GSJ CHISHITSU NEWS

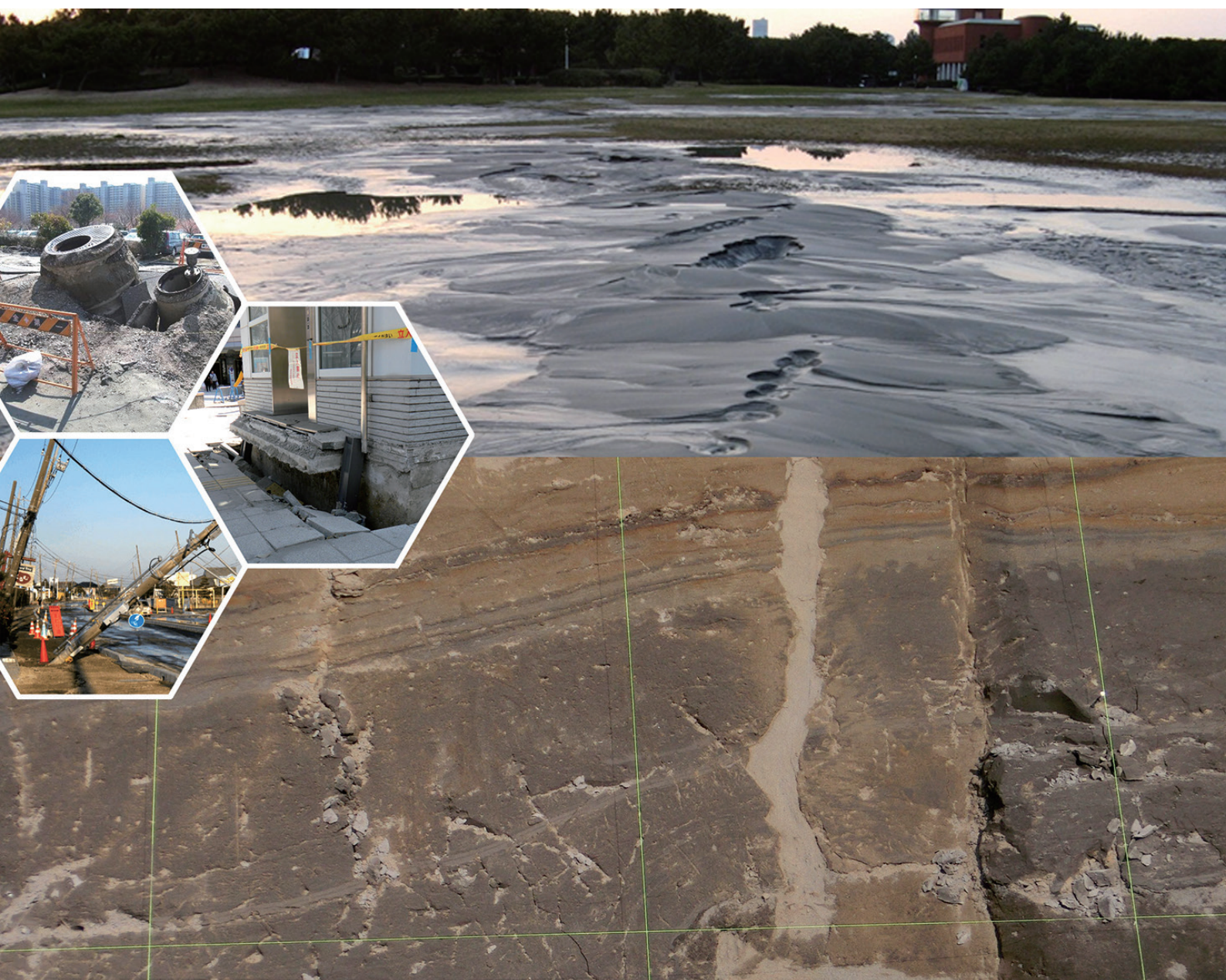
～地球をよく知り、地球と共生する～

2013

12

Vol. 2 No.12

特集：東日本大震災による液状化被害と地質地盤情報の活用



口絵

千葉県神崎町における液状化被害地域のトレンチ掘削調査	水野清秀	353~354
潮来市日の出地区における液状化被害	潮来市建設部	355
浦安市における液状化被害	風岡 修・本間 勝	356

特集：東日本大震災による液状化被害と地質地盤情報の活用

浦安市における液状化被害・復旧状況と不動産取引における地質情報の活用策	本間 勝	357~360
東日本大震災における液状化被害と地理空間情報を活用した液状化発生危険度の予想	小荒井 衛	361~366
2011 年東北地方太平洋沖地震における液状化発生率と強震継続時間の関係の検討	先名重樹	367~370
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	371~375
液状化しやすい地質特性の解明—利根川下流域を対象とした産総研でのとりくみの紹介—	水野清秀	376~379
利根川下流域における液状化被害地域の物理探査・原位置試験調査—液状化調査技術の新展開—	神宮司元治・光畑裕司・横田俊之・中島善人	380~384

編集後記

表紙説明

2011 年東日本大震災による地盤液状化被害

千葉市稲毛海浜公園でみられた噴砂 (写真上：千葉県環境研究センター提供)；神崎町におけるトレンチ掘削調査で観察された噴砂脈の断面 (写真下：水野清秀氏提供)；浦安市高洲中央公園でのマンホールの抜け上がり (小写真上：千葉県環境研究センター提供)；新浦安駅前のエレベーターの抜け上がり (小写真中：本間 勝氏提供)；潮来市内での信号の被災 (小写真下：潮来市建設部提供)。

(説明文：中島 礼¹⁾；写真デザイン：佐藤瑞穂¹⁾ 1) 産総研 地質情報研究部門)

Cover Page

Liquefaction disaster of the Great East Japan Earthquake at Chiba and Ibaraki Prefectures.
(Caption by Rei Nakashima, designed by Mizuho Sato)

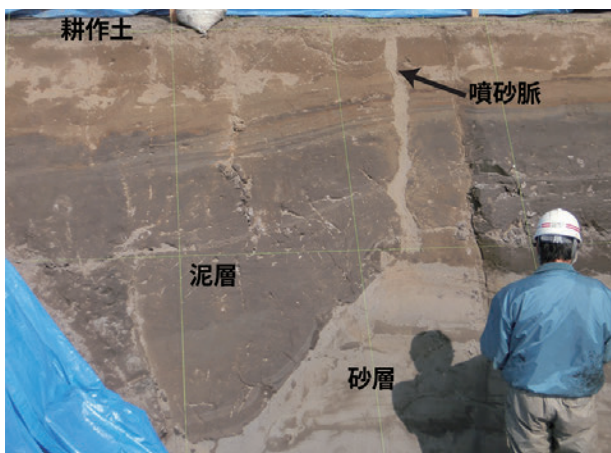
千葉県神崎町における液状化被害地域のトレンチ掘削調査

<水野清秀¹⁾>

2011年に発生した東日本大震災では、東京湾岸から千葉県北東部や茨城県南東部の利根川流域で地盤液状化が発生することで多大な被害が出た。産総研ではこの液状化を起こした地層の構造を調査するために、千葉県環境研究センターと共同で、千葉県神崎町においてトレンチ掘削調査を行った。トレンチの壁面には多くの液状化による砂脈が見られ、この地層を保存するために剥ぎ取り標本を作製した。この剥ぎ取り標本は産総研の地質標本館に展示されている。



掘削したトレンチは、幅・長さ7m、深さ約3mの大きさである。壁面をねじり鎌を用いて整形し、地層の堆積構造を観察した。



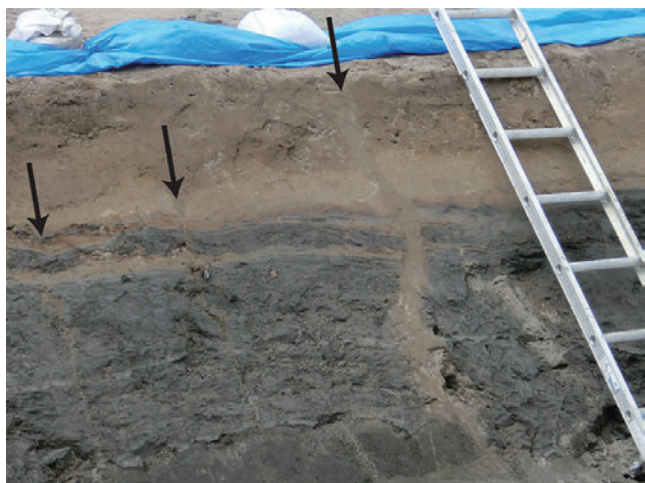
観察された地層は下位より、浚渫された砂層・泥層、そして表面に耕作土が重なる。砂層が液状化し、上位の泥層と耕作土を貫いて地表まで噴砂脈が形成されている（東側壁面）。



浚渫された砂層は液状化により全体的に堆積構造が乱されている。砂層中に砂脈（矢印）が観察され、上面でシート状に広がっている（東側壁面）。

1) 産総研 地質情報研究部門

MIZUNO Kiyohide (2013) Trench excavation survey at liquefied site in Kozaki Town, Chiba Prefecture.



泥層を貫通する噴砂脈（矢印）（西側壁面）.



泥層を貫通する小規模な噴砂脈（西側壁面）.



剥ぎ取りを行うために表面を整形した東側壁面.



トレンチ壁面に布を張り、樹脂を塗り込んでいる様子.



完成した剥ぎ取り標本、左側が上位.



産総研地質標本館で展示されている剥ぎ取り標本、高さ約3m.

潮来市日の出地区における液状化被害

<潮来市建設部¹⁾>



沈下したカーブミラー（電柱）.



噴砂・噴水の瞬間.



噴砂孔.



下水道管の被災状況.



歩道の被災状況.



電柱の被災状況.



電柱の被災状況.



水路の被災状況.

1) 茨城県潮来市

Construction Department, Itako City (2013) Liquefaction disaster at Hinode, Itako City, Ibaraki Prefecture.

浦安市における液状化被害

<風岡 修¹⁾・本間 勝²⁾>



噴砂とその周辺に沈殿した泥（浦安市明海大学テニスコート）.



エレベータホールの抜け上がり（JR新浦安駅前）.



マンホールの抜け上がり（浦安市明海）.



マンホールの抜け上がり（浦安市高洲中央公園）.



地盤の液状化 - 流動化に伴う地割れ（浦安市明海）.



噴砂と道路・ブロック塀の被害（浦安市鉄鋼団地）.

1) 千葉県環境研究センター
2) 明海大学不動産学部

KAZAOKA Osamu and HOMMA Masaru (2013) Liquefaction disaster at Urayasu City, Chiba Prefecture.

浦安市における液状化被害・復旧状況と不動産取引における地質情報の活用策

本間 勝¹⁾

1. はじめに

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（M9.0）により、東日本の太平洋側を中心に、地盤の液状化が発生した。本稿では、市域の約 4 分の 3 が埋立地である千葉県浦安市の液状化被害を例に、その被害と復旧の状況を報告する。さらに、不動産取引の観点から、居住や業務における環境リスクマネジメント検討の一助に資することを目的として、取引慣習における地質情報の活用策を検討する。

2. 浦安市の液状化被害状況と被害額

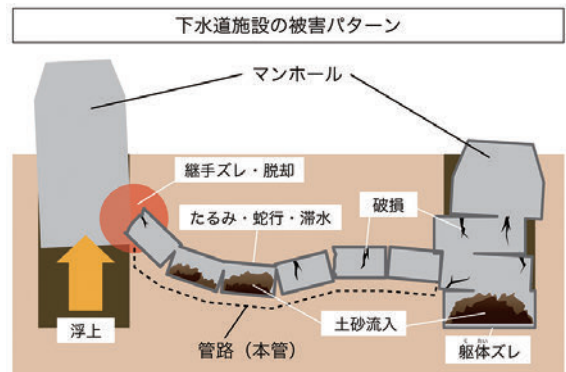
浦安市明海^{あけみ}、日の出、高洲、美浜、今川、弁天、舞浜等の地区が液状化被害を受けた。液状化による死者は確認されていない。被害は建物・土地・公共土木施設等に集中している。被害現象は主に、土地・道路等における地盤の隆起、沈下、噴砂・噴水現象、大規模陥没、地割れなどであった（第 1 図および第 2 図）。それに伴い、戸建住宅の傾き、マンション等集合住宅や大規模建築物の送水縦管の抜け、マンホールの浮上、マンホール躯体のずれ、これに伴う管路の継手ずれ、脱却、たるみ、蛇行、滞水、破損、管への土砂流入などの被害（第 3 図）を受けた。その結果、上水道は 607 カ所で漏水が発生し、最大 33,000 世帯の供用制限（2011 年 4 月 6 日に解除）、都市ガスは 8,631 戸が供給停止（2011 年 3 月 30 日に解除）となった（浦安市復興計画検討委員会、2011）。下水道の被害面積は 440ha、被害戸数は 13,000 戸であった（千葉県県土整備部都市整備局下水道課、2011）。市の試算による発災時における被害想定見込額は、公共土木施設の災害復旧として、道路・橋りょうが 28 施設で概算被害額が約 296 億 3900 万円、下水道のうち下水道事業施設 13 施設が約 268 億 4000 万円、雨水排水施設 13 施設が約 145 億 9400 万円、公園、緑道、球技場など 81 施設が約 22 億 7000 万円であった。その後、被害実態が判明し、結果的に市の公共施設の災害復旧費は約 302 億円となった¹⁾。その他、上水道（千葉県



第 1 図 噴砂土堆積状況（明海大学テニスコート）。



第 2 図 JR 新浦安駅前の地盤沈下（エレベーター入口）。



第 3 図 下水道施設の被害例（浦安市、2013）。

1) 明海大学 不動産学部

キーワード：液状化被害、地質情報、不動産取引、土地、浦安市

水道局)や都市ガス(京葉ガス)の埋設管被害などもあり、大きな被害を及ぼした。

上記の被害は、報告書ベースの定量がしやすい被害状況であるが、現状はそれだけの被害にとどまらなかった。液状化現象による戸建住宅の傾きから、心身的不調を訴える市民も多数出た。住宅の傾きがあると、眩暈、頭痛や不眠などの心身的影響が出やすく、退去を余儀なくされた住民もいる。また、噴砂土が約75,000 m³出たことにより、市内で大気汚染が発生し、外出時にマスクを着用しなければならぬ大気環境が噴砂土撤去までしばらく続いた。また、計画停電による東京ディズニーリゾートテーマパークの休園により、周辺ホテルの営業が悪化、人口の流出現象、不動産市場の非流動化現象、不動産価値の下落現象(スティグマ(心理的嫌悪)の発生;本間, 2004)など、初めて経験する現象が相次いで起きた。

3. 浦安市の液状化復旧事業

3.1 応急復旧

震災発生後の応急復旧措置を行い、4月15日に応急復旧を完了した。市の経費は2011年9月末までの集計で約28億円となった(浦安市, 2011)。特に公共土木施設の応急復旧経費が23億6500万円であり、多くの割合を占めた。

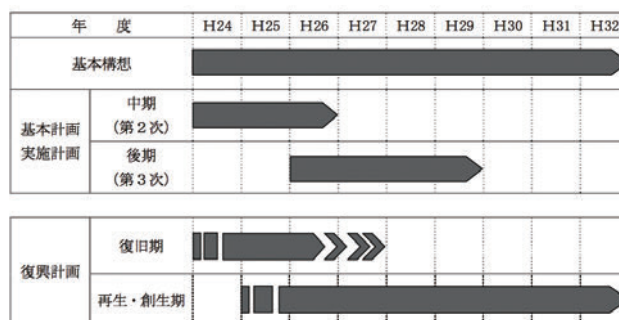
3.2 本復旧の状況

浦安市は2012年3月に浦安市復興計画を取りまとめた。工事の実際の進捗にもよるため、明確な期日設定は難しい。よって、それぞれの事業終了予定年度については、公共主体の都市基盤施設は概ね2014年度から2017年度、民間主体の都市基盤施設も同様、教育・福祉施設は2013年度、コミュニティ施設は最長で2017年度内、としている。実際の工事進捗は、概ね予定通りで推移しているという。併せて、災害に強い市街地の形成を目標としており、具体的施策としては、

- ① 公共公益施設の耐震・液状化対策の強化
- ② 宅地の液状化対策の促進
- ③ 洪水・高潮・津波への対策
- ④ 災害に強い住宅・住環境の形成
- ⑤ 防災拠点や防災ネットワークの機能強化

を掲げている。これらの施策については、最長で2020年度までを予定している(第4図)。

なお、市の液状化対策費は約234億円となっている。



第4図 浦安市の復興スケジュール(浦安市復興計画検討委員会, 2011)

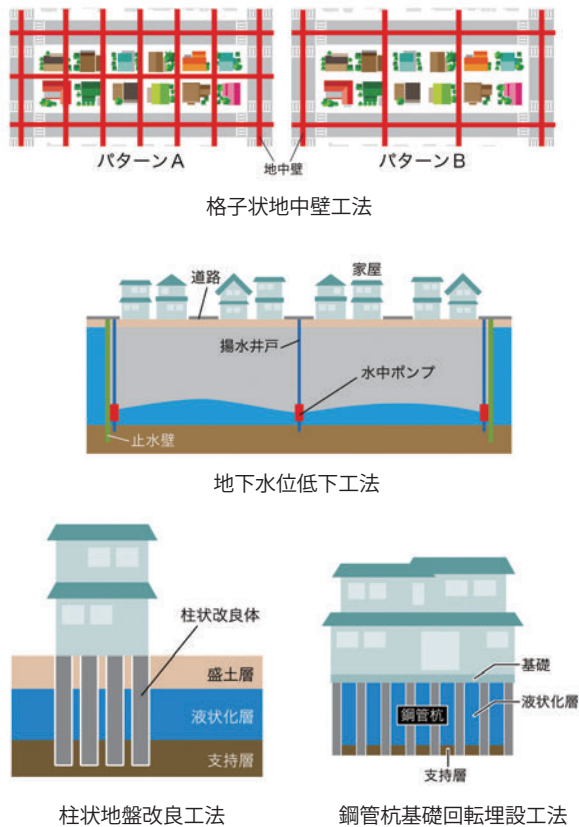
3.3 液状化対策工法

液状化対策における技術検討は、2011年度に浦安市液状化対策技術調査検討委員会、2012年度に液状化対策実現可能性技術検討委員会により検討された。2011年度委員会では、対策工法として「杭状改良工法」、「静的圧入締固め工法」、「格子状地中壁工法(深層混合処理)」、「格子状地中壁工法(高圧噴射)」、「地下水位低下工法」の5つの工法を検討した。次いで、2012年度委員会では、費用負担や技術開発状況からみて、道路と宅地の一体的な対策(市街地液状化対策事業)の望ましい工法として、「格子状地中壁工法」と「地下水位低下工法」を選定し、建て替え時の個別対応の場合の選択肢として「柱状地盤改良工法」、「鋼管杭基礎回転埋設工法」、「その他の工法」とした(第5図)。「その他の工法」では、開発途上段階であることから、「グラベルドレーン工法」、「密度増大工法」、「ドライモルタル締固め工法」、「木杭工法」、「不飽和化工法」を挙げた。

検討委員会の報告を受け、浦安市は「格子状地中壁工法」について、コスト面などで課題はあるものの、一定の仕様で対策をすれば、液状化を抑止する効果がある、と評価した。「地下水位低下工法」については、地盤沈下リスクがあるとして、市として推奨しない、とした。また、家屋の沈下を抑制するとされる「柱状地盤改良工法」と「鋼管杭基礎回転埋設工法」については、家屋の沈下のみを防ぐ工法であり、施工業者によって品質や値段に差が生じる、と評価した。液状化の発生を抑制する工法については、開発途上が多いので、費用との兼ね合いを考慮し、専門家と相談しながら慎重に選択することが望ましい、と結論づけた(浦安市都市整備部市街地開発課液状化対策推進室, 2013)。

3.4 液状化対策の課題

前節の説明のように、浦安市では具体的な工法を検討し



第5図 液状化対策工法概念図（浦安市，2013）。

た結果に基づき、実施に動いている状況である。そのうえで、いくつかの課題が存在すると考える。

住宅地の液状化対策として、格子状地中壁工法が採用されているが、街区に地中壁を造成し格子状に設置する性質から、土地所有者の全員の合意が必要となる。経済的負担と工事を伴うため、各所有者の生活状況もそれぞれであるから、100%の合意形成を図ることは困難が伴う。

また、同工法は地震動による液状化現象を地中壁によって防御する発想である。建物で例えば、制震工法の発想に類似する。しかし、埋立地全域の液状化要素を取り除くことは、埋立造成から期間があまり経過していない場合では、土地の性質上不可能に近いので、液状化が起こる前提で生活に影響する施設（例えば、下水管、上水管等のライフライン）の制震性を施し、地盤復旧は覆土で終える、という考え方も将来の検討に値するのではないかと考える。すなわち、液状化は何度も起こり得る、という前提条件から始まり、その被害を前提にした技術が対応し、復旧もスムーズに行えるという予防策の考え方である。

実状、浦安市の復旧状況を見ると、生活している人々の生活感覚的被害という観点では、復旧までの生活不便さはある程度あるが、液状化原因で死者が出ていないこと、逆

に日常生活圏である地表面がきれいにリニューアルされることで快適性が戻ることから、社会経済性の観点から見れば、結果的に社会基盤のリニューアルが図られ、その都市の基盤寿命が新たに延長されることとなる。

また、不動産市場にみられるスティグマも、経年によって回復していくことから、市場価値は時の経過によりほぼ震災前の水準に戻ると見られる。

一方で、今後、埋立地の造成を行う場合において大切なことは、建築物を建設する際、基礎構造の深度が浅い戸建住宅や小規模建築物の液状化による傾きの予防策を講じる技術を個別の案件に応じて適切に採用して実施することが重要である。対策技術は既に多く存在しており、当該敷地においてそれらの技術のうち、どの工法が最適であるかを検討することができる環境整備が必要ということになる。

4. 不動産取引時の土地情報伝達の現状

不動産の取引において、土地の情報を綿密に買主に伝達する具体的なルールは存在していない。あくまでも民法が求める公平公正な売買の理念のもと、瑕疵や不法行為に当たらない土地取引を求めているに過ぎない。

しかし、市民は国土の平野部分に居住する傾向が近年強くなってきており、海岸平野で形成する三大都市圏（首都圏・関西圏・中部圏）に総人口の半分以上が居住している今日において、土壌・地質の性質を売買当事者が把握をする環境は必要不可欠といえる。

その土地を知らずに売買を行うことは、商品を知らずして売買していることであり、結果的にリスクを伴う。情報が開示されることにより、市場価格形成にマイナス要因となる、という考えから極めて消極的な行動となり、法人間取引の一部を除いて、今現在調査する習慣がない。液状化現象の例にもあるように、その土地の調査情報を得て、事前に対策をとることによって、将来リスクをヘッジすることが可能になるのであり、本来の価格形成理論から検討すれば、マイナス要因どころかプラス要因になるのであり、誤認識が定着していると言わざるを得ない。

東日本大震災以降、自主的に地歴等を調査する消費者も増えている。しかし、消費者が自主的に調査できる内容も限られてしまうのが現実である。これらの調査については、専門家によるサービス環境の整備が必要ではないか。

5. 不動産取引時の地質情報の活用策

5.1 地質情報の今後

日本の地質情報は、政府機関や研究所や大学などのそれぞれの主体において、精度の高い情報を既に保持している。しかしながら、それらの情報はそれぞれの実施主体が保持していることにより、活用が十分になされていない、という実態もある。国土交通省では、それらの情報を活用する発端として、検討を行い、「土地総合情報ライブラリー」をweb上にまとめた²。今後はそれらの断片的な情報を社会経済活動の有益性から検討して必要な情報間を統合し、web-GISを活用して視覚的にわかりやすい情報基盤を整備することに意義があるであろう。

一方で、環境測定分野のサービスコストの国際競争を考えれば、需要の喚起によって市場変化も今後あり得る。環境測定における簡易測定の需要を増大させ、掘削費用の通減を市場で図り、より効率的かつ簡便正確な掘削方法・検査方法の開発が必要である。測定の現場計測やITの活用などにより、正確性と同時に業務効率化を求められる。また、ラボ分析の需要拡大から、測定業の経営規模拡大も国際競争や業界再編を含めて必要な時代環境となる可能性がある。よって、低価格化、簡便化、迅速化によって新たな需要や国際競争力に対応する必要性もあり得る。

5.2 不動産における地質情報の活用検討

不動産の分野においては、土地の環境情報提供が慣習化していないことから、開発におけるトラブル予防の観点から、積極的な情報活用と慣習化が望まれるところである。

第1段階として、各学問分野における特に検討すべき項目を抽出して列挙すると、

地盤（人々の生活基盤や活動範囲に関係する地層部分）

土性、地盤強度、圧密特性、土地利用、上下水道、揚水施設、ライフラインなど

地形（地表の形態、高低・起伏）

地形区分、地下水流動方向、地下水涵養域・流出域

地質（岩石・地層の種類、重なり方、空間的配置・歴史）

地質構造、帯水層区分、地下水位、地下水成分、地歴など
土壌（地殻の最表層生成物、土地の表層部）

土壌硬度、三相組成、浸透力、保水力、透水性、腐植、pH（水素イオン濃度）、化学物質含有量、礫含有量などとなる。

6. おわりに

地表面より下の空間について、既存学問の分類は非常に

細分化されている歴史がある。それぞれの学問分野の深化により、既に多くの知見を得ている。一方で、現実の事象に学問境界はあるわけもなく、それぞれの知見が点として存在する中、点が線となり、線が面となる総合的アプローチが必要な時代に入っている。

自然科学と社会科学の融合への試みは、情報化が急速に進んでいる今日において、必要不可欠であり、それぞれの知見の結集が求められるであろう。不動産の科学は、国際的には1世紀前後という若い学問体系であり、日本においてはその端緒についたばかりであり、更なる深化が求められる。

1 そのうち、国の災害査定額は約199億円であり、最終的に約164億円の復旧事業費のほか、震災復興特別交付税約81億円を国が負担する。

2 国土交通省土地・水資源局土地政策課は2010年に「土地取引に有用な土壌汚染情報の提供に関する検討会」による報告をうけ、土地総合情報ライブラリーの土地基本情報に各関連データの紹介を掲載したが、web-GISの活用といったデータ加工の先進性はまだ実現途上にある。

文 献

千葉県県土整備部都市整備局下水道課（2012）東日本大震災における被害状況について。第590回建設技術講習会講演資料、http://www.zenken.com/kensyuu/kousyuukai/H24/590/590_k.nakamura.pdf（2013/10/18 確認）

本間 勝（2004）環境公害報道における地図情報が人々の認知要素に与える影響。日本土地環境学会誌、no.11, 1-11。

浦安市（2011）広報うらやす 2011年9月20日発行、http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/20149/tokushu_11_09_20.pdf（2013/10/18 確認）

浦安市（2013）広報うらやす 2013年1月30日発行、http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/20149/01_30kohotokushu.pdf（2013/10/08 確認）

浦安市復興計画検討委員会（2011）浦安市復興計画検討委員会第1回資料、http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/27466/05_higaitotaiou2.pdf（2013/10/18 確認）

浦安市都市整備部市街地開発課液状化対策推進室（2013）市街地液状化対策事業住民説明会資料、<http://www.city.urayasu.chiba.jp/secure/33824/shiryo.pdf>（2013/10/18 確認）

HOMMA Masaru (2013) Utilization plan for geological data in real estate transactions and recovery status from liquefaction damage in Urayasu City.

（受付：2013年10月18日）

東日本大震災における液状化被害と 地理空間情報を活用した液状化発生危険度の予想

小荒井 衛¹⁾

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分に発生した東北地方太平洋沖地震（M9.0）は、関東地方の広大な範囲で液状化・流動化現象を発生させ、家屋や公共施設、ライフライン等にも甚大な被害を生じさせた。関東地方整備局・地盤工学会（2011）によると、関東地方の極めて広い範囲で液状化現象が発生し、特に、東京湾岸の埋め立て地域や茨城県と千葉県の県境を成す利根川下流域では、多量の噴砂や流動化現象に伴う地表の変状、構造物の傾斜や沈下、地下埋設物の抜け上がり、耕作地における砂泥の堆積などの被害が発生した。小荒井ほか（2011）、小荒井（2012）、小荒井・中埜（印刷中）は、液状化被害の状況を把握し、液状化が集中している地域とその土地の成り立ち（履歴）との関係を分析するため、利根川流域や東京湾岸を中心に現地調査を行うとともに、その結果を同地域の迅速測図原図、旧版地形図、過去の空中写真等の時系列地理情報や土地条件図、治水地形分類図等の土地の履歴が確認できる主題図情報と照合し、液状化被害が著しい地域の地形条件について整理している。本稿では、これらの成果を紹介すると共に、地形地盤情報から液状化のリスクを評価する対応表を作成し、その表を実際の地震時地盤災害予想システムで実装した結果について紹介する。

2. 土地の履歴把握に有用な地理空間情報

液状化が発生する可能性の高い場所は地下水位の高い砂地盤であり、埋立地、干拓地、旧河道、砂丘・砂州間低地などがあげられる。液状化が発生しやすい地域を把握するためには、土地の成り立ち（履歴）を知ることが重要である。国土地理院では、これまで長年にわたって整備してきた地形図や空中写真等の時系列の地理空間情報をアーカイブ化し、一般に提供している。これらの時系列地理空間情報で土地の履歴を知ること、液状化が発生しやすい地域

をあらかじめ把握することが可能となる。

2.1 旧版地形図

明治時代中期以降、国土地理院の前身の陸地測量部時代から1/50,000、1/25,000などの地形図が全国整備されてきた。これらの旧版地形図は、つくば市にある国土地理院本院や全国各地の地方測量部で閲覧でき、国土交通省オンライン申請システム、国土地理院本院および関東地方測量部で謄本交付の申請をすることにより、誰でも入手可能である。

2.2 過去の空中写真

1940年代後半に米軍が全国を1/40,000の写真縮尺で撮影しており、国土地理院は主に1960年代以降に全国を撮影している。なお、縮尺の大きな（1/10,000程度）カラー空中写真は1970年代後半以降に撮影されている。これらの空中写真は、国土変遷アーカイブ事業としてデジタル化を進めており、デジタル化が完了したもののから順次、国土地理院のホームページで公開しており、検索・閲覧が可能である。

2.3 迅速測図原図

第一軍管地方二万分之一迅速測図原図（以下、「迅速測図原図」という）は、明治13年～19年にかけて参謀本部が作成した地図である。関東平野のほぼ全域と房総・三浦半島をカバーしている。フランス式の彩色を施した図式に特徴があり、当時の景観を把握しやすい。迅速測図原図については、国土地理院において閲覧・謄本交付が可能のほか、復刻版が日本地図センターから地区ごとに販売されている。また、（独）農業環境技術研究所ホームページの「歴史的農業環境閲覧システム」（<http://habs.dc.affrc.go.jp/> 2013/10/10 確認）でも閲覧可能である。このシステムでは、迅速測図原図をシームレスで基盤地図情報と重ねて表示することもでき、土地の変遷を把握するのに有効である。

1) 国土地理院 地理地殻活動研究センター

キーワード：液状化、東日本大震災、地理空間情報、土地の履歴、危険度予想

また、国土地理院では迅速測図原図から当時の低湿地の分布を抽出したものを、「明治前期の低湿地データ」として公開している。ここで言う「低湿地」は、河川や湿地、水田・葦の群生地など「土地の液状化」との関連が深いと考えられる区域のことである（http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lc_meiji.html 2013/10/10 確認）。

2.4 主題図（土地条件図・治水地形分類図）

土地の履歴を知るには、その土地の地形発達を読み解ける地形分類の情報も有効である。そのような情報を含んだ主題図情報として、土地条件図、治水地形分類図がある。これらの主題図の整備地域は限定的であるが、液状化を起こしやすい地形である旧河道や干拓地、埋立地、盛土地などの人工地形の範囲が明示されており、整備範囲や整備項目も含めて国土地理院のホームページで閲覧することができる。

3. 利根川中下流域等での液状化被害の状況と土地履歴の関係

筆者は、利根川中下流域（霞ヶ浦・小貝川・鬼怒川等を含む）について、液状化の概要をつかむ調査を行ってきた。このうち、液状化被害と地形との対応が極めて良い事例をいくつか紹介する。

3.1 茨城県稲敷市結佐・千葉県香取市石納周辺

茨城県稲敷市結佐地区から千葉県香取市石納地区にかけては、利根川の旧河道を埋めた土地で、集落の多くは自然堤防上に位置している。本地域では1987年の千葉県東方沖地震の際にも液状化が発生した。稲敷市上結佐地区と同六角地区の北側では、液状化による住宅の傾動や沈下、道路の地波現象などが認められた（第1図のA）。旧河道部の水田や畑には噴砂した痕跡があり、水田を埋土した住宅では盛土部分が崩落して割れ目が入り、宅地ごと傾動している住宅があった。また、全体が大きく沈下して、道路や住宅ごと水没している箇所もあった。この地区は、迅速測図原図や昭和20年代の1/25,000地形図（第2図）を見ると、以前は沼が存在していた。

香取市野間谷原地区・石納地区と稲敷市中新田地区の間では、水田で広域的に噴砂している地域が多く、調査時点（2011年6月）で田植えをしている水田はほとんど無い状況であった（第1図のB）。そこに立地しているマンションでは、20 cm弱ほどの抜け上がりが観察された（第1図



第1図 茨城県稲敷市結佐・千葉県香取市石納周辺の液状化被害の状況（小荒井ほか，2011）。背景は電子国土 Web システムを使用。



第2図 昭和20年代の1/25,000地形図と液状化発生地域（昭和21年刊行「佐原」、昭和29年刊行「麻生」。小荒井ほか，2011）。

のB)。一方で、少なくとも明治時代からの陸地である香取市野間谷原地区・石納地区（第1図のC）、稲敷市中新田地区（第1図のD）では、噴砂等の液状化の痕跡は確認できなかった。

この地域は、迅速測図原図を見ると、明治10年代には利根川の河道であった。その後、利根川の河道付け替えがなされたが、この場所は今も千葉県と茨城県の県境となっている。昭和20年代の1/25,000地形図（第2図）を見ると、利根川本流ではないが、水部としてまだ残されている。このような利根川の旧河道や昔の沼地だった地域で、液状化が発生している。

3.2 千葉県神崎町周辺

千葉県神崎町松崎地区から神崎神宿地区にかけては、利根川の旧河道を埋めた土地が帯状に連続している。1987年



第3図 千葉県神崎町周辺の液状化被害の状況 (小荒井ほか, 2011).
背景は電子国土 Web システムを使用.



第4図 神崎町周辺の迅速測図原図と基盤地図情報. 歴史的農業環境閲覧システムによる.



第5図 神崎町周辺の2005年国土地理院撮影のカラー空中写真
(CKT-2005-3X C10-22).



第6図 我孫子市布佐地区の液状化被害の状況 (小荒井ほか, 2011).
背景は電子国土 Web システムを使用.

の千葉県東方沖地震の際にも液状化が発生した。現地写真を第3図に示す。噴砂が広域に発生した範囲が旧河道の範囲と一致する(第3図のA)。旧河道の北の縁に沿った公園では、川底からの噴砂により河川の中心部が砂で埋まっていた(第3図のB)。駐車場では激しい亀裂やうねりが存在し、トイレなどの構造物は50 cm以上も抜け上がっていた(第3図のC)。この箇所は、明治10年代の迅速測図原図では利根川の本流となっている(第4図)。1947年撮影の米軍写真(USA-R391-23)では、旧河道が封鎖され水部が干上がっていく過程がわかる。現在は土地区画整理により周辺の水田と同じ高さとなり、畦の形も整形されているので、現地で旧河道の存在を認識するのは困難である。2005年撮影のカラー空中写真(CKT-2005-3X C10-22)では、色調の違いから旧河道の縁を判読することは可能である(第5図)。

3.3 千葉県我孫子市布佐地区

千葉県^{あびこ}我孫子市の^{ふさ}JR布佐駅周辺で液状化現象が認められた。液状化の被害が顕著な箇所は限定的であり、布佐地区から都地区の境界付近から、^{ふさとりまち}布佐西町地区の北部にかけての地域である(第6図)。噴砂や、電柱・ブロック塀・家屋の傾動・沈下、地波現象(道路の波打ち)などの液状化被害が生じていた。なおこの地域は、1987年千葉県東方沖地震では液状化被害の報告はない。顕著な液状化現象は限定した範囲で出現しているの、その土地の変遷を調査した。治水地形分類図を見ると、被害の大きかった場所は旧河道の沼を埋め立てた土地であることがわかる。1947年撮影の米軍空中写真(USA-M675-1)を見ると北東-南西方向に伸びる細長い水部が存在している(第7図上)。今回の地震で液状化が激しかった県道沿いの带状の箇所が、その細長い水部の箇所と一致している。1962年撮影の空中写真(MKT-62-1 C11-17)では、その水部に該当する箇所が埋め立てられ住宅地となっている(第7図下)。

我孫子市は2010年に「あびこ防災マップ」を作成し、市民に配布している。この中には液状化危険度マップも含まれている。布佐駅周辺の液状化被害が著しかった範囲は、液状化危険度マップでは大部分が液状化の危険度がほとんどないとされている。液状化危険度マップの作成にあたっては、内閣府の「地震ハザードマップ作成技術資料」に従い、1/50,000土地分類基本調査の地形分類図を用いて50mメッシュの微地形区分データを作成し、メッシュ毎に液状化危険度の評価を行っている。地形分類図では該当箇所は盛土地となっており、水部の埋め立てという情報が入っていないため、空中写真や旧版地図などの資料を活用して把握することのできる土地の履歴の情報が反映されておらず、そのことが液状化の危険度を十分に評価できなかった一因と考えられる。東日本大震災後、我孫子市ではハザードマップを作成し直しており、今回は土地の履歴情報を十分に反映させて、旧河道や水部の埋め立て地での液状化のリスクを高く評価している。今回のハザードマップの作成では、国土地理院の中で組織横断的に組織された「防災情報支援チーム」が、既存の地理空間情報を活用して地域の災害リスクを評価する方法等について我孫子市や受注業者に対してアドバイスをを行い、ハザードマップ作成の支援を行っている。

4. 地形地盤情報を活用した液状化リスクの予想

小荒井（2010）では、地形分類を災害脆弱性へ読み替える表を提案した（第1表）。そこで提案している地形分類は山地や台地では大まかではあるが、低地では土地条件図よりも細かな分類を提案している。具体的には、砂丘を「中央部」と「縁辺部」とで分けて評価する、谷底平野・氾濫平野、海岸平野・三角州を「やや開けた」か「閉塞した」とに分けて評価するなどである。同じ地形分類であっても構成物質の粒子サイズや地下水位に違いがあり、これが地盤の脆弱性に差を与えるからである。低地については、細かな地形分類情報が存在すればそれも考慮しながら、浅層の地質構造も反映できるように地形発達を踏まえて地形単元の地理的特性を類型化し、類型に応じて想定される災害状況と程度を整理するのが望ましい。小荒井ほか（2008）によると、中越沖地震の事例では、砂丘の中でも相対的に地盤が良くないとされている箇所では、地盤の側方流動等が発生して建物被害が集中する箇所が認められた。砂丘と低地の縁の部分での被害が顕著であったが、柏崎平野は河口が砂州の発達で閉塞気味となって後背湿地のような環境で



第7図 我孫子市布佐地区周辺の過去の空中写真。
上：1947年米軍撮影の空中写真（USA-M675-1）。
下：1962年国土地理院撮影の空中写真（MKT-62-1 C11-17）。

第1表 地形分類の地震時地盤災害リスク読み替え表（小荒井，2010）。

地震に対する脆弱性	地形分類
小	山地、台地・段丘（高位・上位・中位・下位）
やや小	台地・段丘（低位）、山麓堆積地形、扇状地・緩扇状地、古砂丘
中	砂丘（中央部）、自然堤防、砂州・砂堆、天井川、頻水地形、人工改変地（切土）
やや大	砂丘（縁辺部）、谷底平野・氾濫平野（やや開けた）、海岸平野・三角州（やや開けた）、凹地・浅い谷、人工改変地（盛土）
大	谷底平野・氾濫平野（閉塞した）、海岸平野・三角州（閉塞した）、後背低地、旧河道、旧水部、人工改変地（大きな谷埋め盛土）

砂が堆積しており、同じ砂丘であっても隣接する地形との関係で災害の脆弱性が変わってくる。また、自然堤防についても、「根のある」自然堤防と「根の無い（後背低地の上に薄く砂層ののるような）」自然堤防では、被害の状況

が違ふことを論じている。

以上のようなことを背景に、小荒井ほか(2013)では松岡ほか(2011)や若松ほか(2005)などを参考にしながら、震度と地形分類による液状化被害予測の対応表を作成した。ここでは、若松・松岡(2009)による250mメッシュの地形分類情報を元に、国土地理院の10mDEM(数値標高モデル)による解析結果を加えて、地形分類の細分化を行っている。具体的には、砂丘については縁辺部でどのような地形と接するかによって地下水位の状況が変わるので、低地の一般面と接する砂丘の縁辺部は液状化のリスクを高くしている。谷底低地については勾配の違いが構成物質のサイズに影響することから、傾斜で二分して緩傾斜の場合をより液状化のリスクが高いとした。自然堤防については、根の有無を地形で判断するのは難しいが、地下水位の高低等も考慮して周囲の地形との比高に置き換えて二分して、比高の小さいものをより液状化のリスクが高いとした。新たに作成した対応表を第2表に示す。

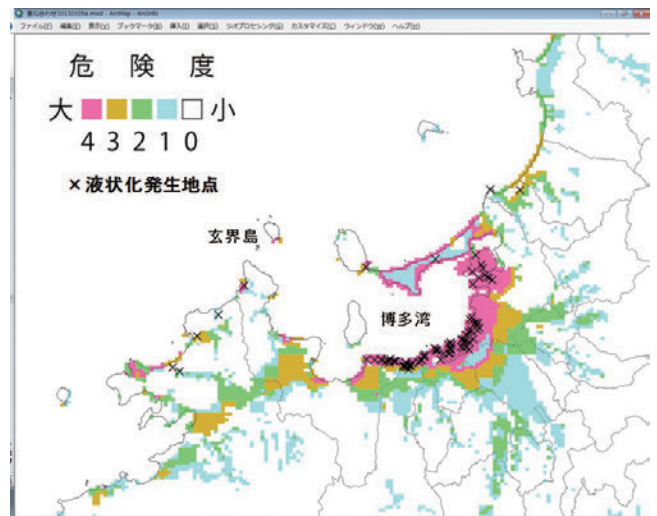
国土地理院では、開発した「地震時地盤被害予想システム」(神谷ほか, 2012)の中で、液状化の予想については第2表を実装している。このシステムは震度5弱以上の地震発生後10分程度で気象庁から配信される1kmメッシュの推計震度分布情報を使って、斜面崩壊・地すべり・液状化のリスクを5段階で表示して、地震発生後15分以内に関係機関に配信することを目標に開発したシステムである。液状化リスク評価については、第2表に示す震度と地形分類の対応表から250mメッシュの液状化リスクを5段階で評価している。過去に推計震度分布が配信された地震に適用して検証したところ、2005年の福岡県沖の地震(第8図)、2007年中越沖地震(第9図)など、実際に発生した液状化分布と比べて良好な予想結果であった。唯一、2004年中越地震の長岡付近の平野部での予想結果が、リスクが低いと評価した箇所でも液状化が多数発生していた(第10図)。この場所は、扇状地における砂利採取跡地に川砂を埋めた場所であり、地形分類だけで予想するのは困難であり、やむを得ないケースと判断した。現在このシステムは国土地理院内で試験運用中であり、地震発生時の院内の災害対応を検討する際に参考情報として使用している。2013年4月に発生した淡路島の地震では、淡路島東岸の埋め立て地で液状化の発生可能性が高いと判断したが、実際にも液状化が発生しており大きな被害もたらされていた。今後は、試験運用の結果を見て、必要に応じて政府の災害対応部局に自動的に予想情報を発信していく予定である。

第2表 液状化危険度に対する地形分類と震度の関係表(小荒井ほか, 2013)。

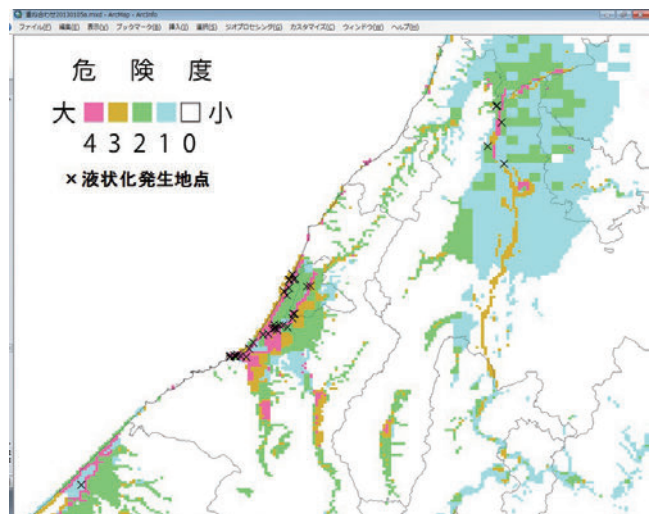
地形分類 震度	山地 丘陵 火山性丘陵 礫・岩礫 水域	山麓地 火山山麓地 岩石台地 ローム台地	扇状地 砂礫質台地	扇状地*1 砂丘	自然堤防*2 砂州・砂洲 後背湿地 谷底低地	干拓地 三角州・海岸低地 自然堤防 谷底低地*1	砂丘*3 砂州・砂丘間低地 埋立地 旧河道 河原
7	0	1	2	3	4	4	4
6強	0	0	1	2	3	4	4
6弱	0	0	0	1	2	3	4
5強	0	0	0	0	1	2	3
5弱	0	0	0	0	0	1	2

0:危険度無
1:危険度小
2:危険度中
3:危険度大
4:危険度極大

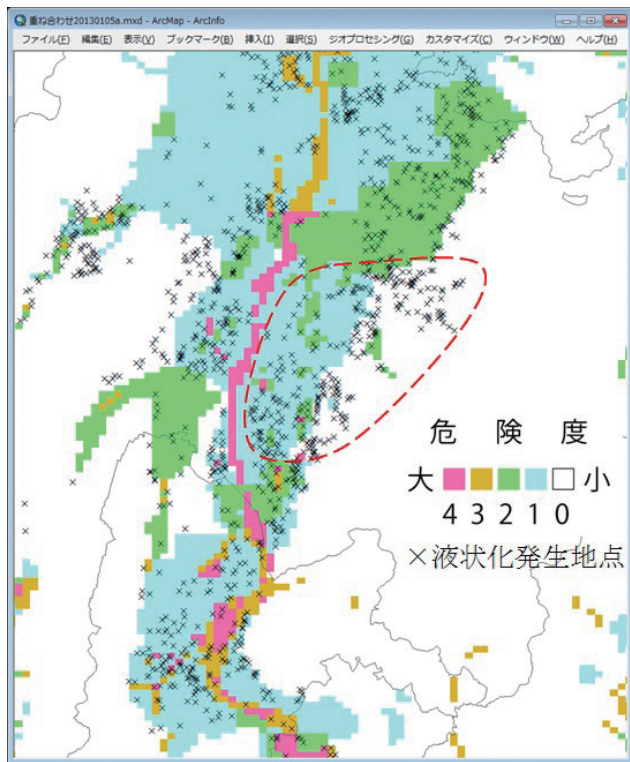
*1 傾斜が緩い場合(勾配1/100未満)
*2 比高が高い場合(5m以上)
*3 低地に接する砂丘の縁の場合



第8図 2005年福岡県沖地震の液状化危険度予想と実際の液状化発生箇所の分布(神谷, 2013)。



第9図 2007年中越沖地震の液状化危険度予想と実際の液状化発生箇所の分布(国土地理院, 2013, スライド46を改変)。



第 10 図 2004 年中越地震の液状化危険度予想と実際の液状化発生箇所の分布 (神谷, 2013).

5. おわりに

液状化ハザードマップの作成では、旧河道や水部の埋立地などを適切に表現する必要があり、将来的には 50 m メッシュレベルで全国の地形地盤情報を、リモートセンシング技術なども併用しながら簡便に作成する技術が求められている。そのために必要な地形分類体系の検討も不可欠であり、本研究を通して得られた知見から新たな体系について考えられる素案も可能な範囲で提示したい。

文 献

神谷 泉 (2013) 地震時の地盤災害のリアルタイムの予想. 第42回国土地理院報告会, 国土地理院技術資料 A1-No. 370, 67-73.

神谷 泉・乙井康成・中埜貴元・小荒井 衛 (2012) 地震による斜面崩壊危険度評価判別式「六甲式」の改良と実時間運用. 写真測量とリモートセンシング, 51, 381-386.

小荒井 衛 (2010) 災害軽減に向けた地理空間情報の活用. 地理, 55, no. 5, 62-68.

小荒井 衛 (2012) 東日本大震災における液状化被害と地形履歴—鬼怒川流域、小貝川流域を中心に—. 地理, 57, no. 2, 90-108.

小荒井 衛・中埜貴元 (印刷中) 東北地方太平洋沖地震による利根川中下流域の液状化被害分布と過去の地形図・空中写真等からみる地形条件. 地質汚染—医療地質—社会地質学会誌.

小荒井 衛・佐藤 浩・長谷川裕之・宇根 寛 (2008) 平成19年 (2007 年) 新潟県中越沖地震による地盤変状. 国土地理院時報, no. 114, 81-90.

小荒井 衛・中埜貴元・乙井康成・宇根 寛・川本利一・醍醐恵二 (2011) 東日本大震災における液状化被害と時系列地理空間情報の利活用. 国土地理院時報, no. 122, 127-141.

小荒井 衛・中埜貴元・神谷 泉・松岡昌志 (2013) 地形分類情報を活用した液状化発生危険度の予測. 日本地球惑星科学連合2013年大会予稿集, <http://www2.jpigu.org/meeting/2013/session/PDF/H-SC25/HSC25-10.pdf> (2013/10/10 確認)

国土地理院 (2013) 平成24年度第2回国土地理院研究評価委員会概要, 「地震災害緊急対応のための地理的特性から想定した被害情報の提供に関する研究」【説明資料】, <http://www.gsi.go.jp/common/000080217.pdf> (2013/10/10 確認)

国土交通省関東地方整備局・公益社団法人 地盤工学会 (2011) 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態説明報告書, http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043569.pdf (2013/10/10 確認)

松岡昌志・若松加寿江・橋本光史 (2011) 地形・地盤分類250 mメッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法. 日本地震工学会論文集, 11, no. 2, 20-39.

若松加寿江・松岡昌志 (2009) 全国を網羅した地形・地盤分類250 mメッシュマップの構築. 第3回シンポジウム「統合化地下構造データベースの構築」予稿集, 15-20.

若松加寿江・久保純子・松岡昌志・長谷川浩一・杉浦正美 (2005) 日本の地形・地盤デジタルマップ. 東京大学出版会, 104p., CD-ROM付.

KOARAI Mamoru (2013) Liquefaction damages of the East Japan Great Earthquake and evaluation of liquefaction risk using geospatial information.

(受付: 2013 年 10 月 10 日)

2011年東北地方太平洋沖地震における液状化発生率と強震継続時間の関係の検討

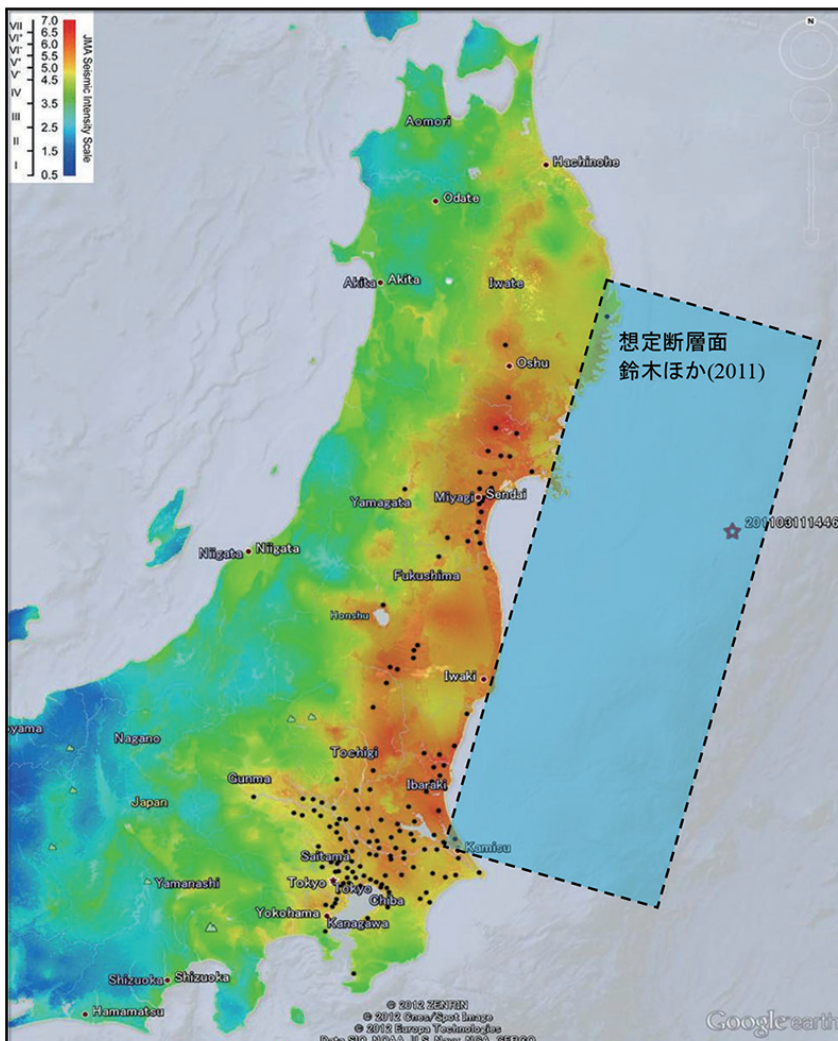
先名重樹¹⁾

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、311地震と呼ぶ）では、東北地方から関東地方にかけての極めて広い範囲で液状化被害が発生した。今回の地震は、被害地域が広大であったことに加えて、計画停電やガソリン不足等の影響で被害調査の初動に大きな支障をきたしたことなどの理由により、地震から1年程度を経過した

時点でもその全容は明らかになっていなかった。筆者等の現地調査（先名ほか、2012）や、学会等における調査情報（国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会、2011）、自治体などの情報によれば、液状化が発生した地域は、第1図に示すように、現時点において、東北地方の6県（宮城県、福島県、青森県、岩手県、秋田県、山形県）と関東地方の1都6県（東京都、栃木県、群馬県、茨城県、埼玉県、千葉県、神奈川県）に及んでおり、想定震度分布をみると、概ね、震度5強以上の区域が存在する自治体で液状化が発生していることがわかる。そのなかでも、特に関東の被害範囲・規模は非常に大きなものであった。被害が大きくなった理由について、今回の地震の余震を含めた継続時間の長さが液状化の発生率と被害規模を大きくしたとの研究報告（安田、2011）もなされている。本報告は2011年12月までにまとめられたものに基づくが、調査されていない、あるいは調査が不十分な地域も多数あることから、まずは、311地震時の液状化発生地点の再整理を行い、液状化地点数を250mメッシュ単位でまとめた。

次に、再収集された液状化の情報に基づいて、311地震の地震動の継続時間の影響を考慮した液状化発生率の検討を目的として、K-NET、KiK-net、気象庁、自治体の地震計の波形記録から、震度および「リアルタイム震度」（功刀ほか、2008）を計算し、液状化発生地点のデータと松岡ほか（2011）の液状化発生率を計算する手法を用いて継続時間の長さが液状化に与える影響を検討した。

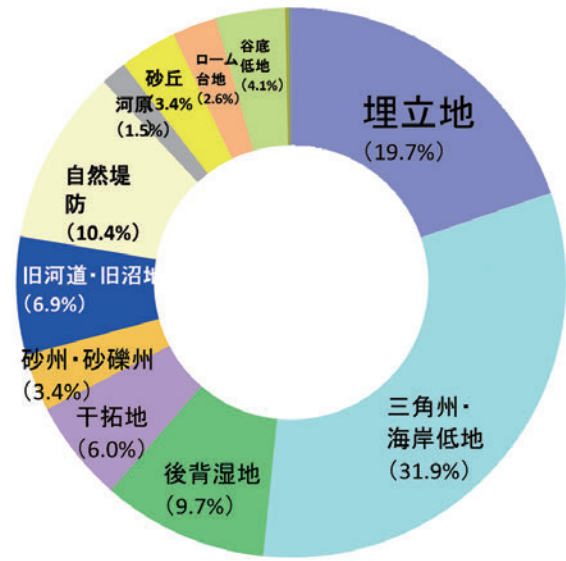


第1図 東北地方太平洋沖地震における液状化が確認された市町村分布図と想定震度分布との関係。

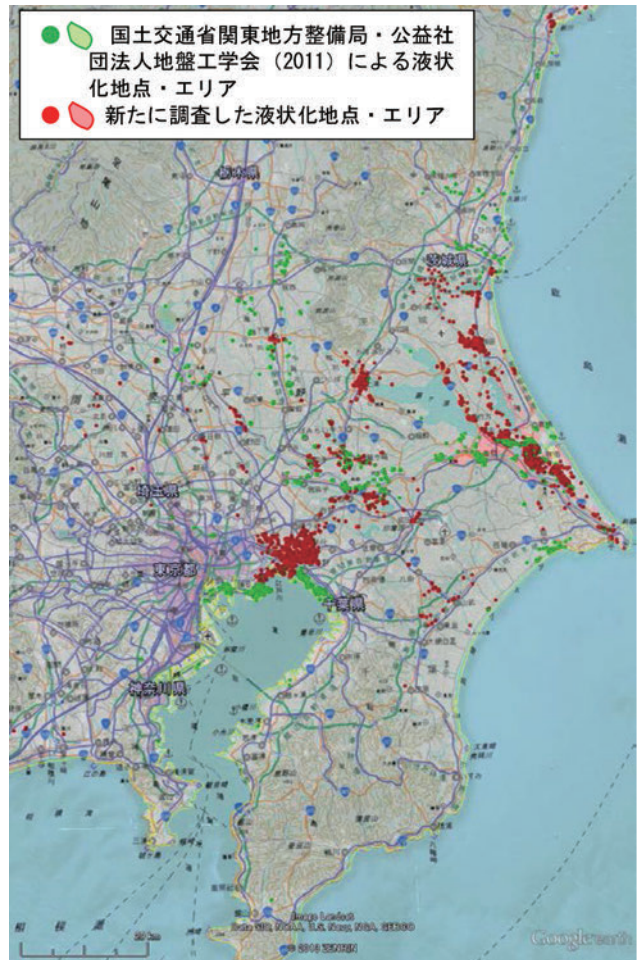
1) 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域



第2図 東北地方太平洋沖地震の液状化地点。新たに調査した情報は2013.9.30現在。



第3図 関東地方の液状化地点に占める各微地形区分の割合。



第4図 東北地方太平洋沖地震の液状化地点（関東平野拡大図）。新たに調査した情報は2013.9.30現在。

第1表 関東地方の液状化地点数（250 m メッシュ数換算）。

区分No.	微地形区分	低地・台地・山地区分	液状化発生メッシュ数	関東地方(1都6県)全メッシュ数	関東地方の全メッシュに対する液状化発生メッシュの割合 (%)	関東地方の液状化メッシュに占める各微地形区分の割合 (%)
20	埋立地	低地	1383	5806	23.82%	19.73%
15	三角州・海岸低地	低地	2236	11868	18.84%	31.90%
13	後背湿地	低地	683	27477	2.49%	9.74%
19	干拓地	低地	422	3432	12.30%	6.02%
16	砂州・砂礫州	低地	236	8307	2.84%	3.37%
14	旧河道・旧沼地	低地	486	2338	20.79%	6.93%
12	自然堤防	低地	726	10299	7.05%	10.36%
22	河原	低地	107	4098	2.61%	1.53%
17	砂丘	低地	236	2764	8.54%	3.37%
9	ローム台地	台地	183	104650	0.17%	2.61%
10	谷底低地	台地	286	25122	1.14%	4.08%
18	砂州・砂丘間低地	低地	16	1748	0.92%	0.23%
23	河道・水路	低地	6	207	2.90%	0.09%
11	扇状地	台地	2	17065	0.01%	0.03%
3	丘陵	山地	1	40094	0.00%	0.01%
1	山地	山地	0	146454	0.00%	0.00%
2	山麓地	山地	0	4271	0.00%	0.00%
4	火山地	山地	0	17804	0.00%	0.00%
5	火山山麓地	山地	0	18804	0.00%	0.00%
6	火山性丘陵	山地	0	8024	0.00%	0.00%
7	岩石台地	台地	0	75	0.00%	0.00%
8	砂礫質台地	台地	0	32654	0.00%	0.00%
21	礫・岩礫	—	0	205	0.00%	0.00%
24	湖沼	—	0	3219	0.00%	0.00%
合計	-	-	7009	496785	1.41%	100.00%

2. 計測震度とリアルタイム震度分布の計算について

継続時間の考慮をするにあたり、まず、松岡ほか(2011)による、液状化発生率の計算方法に基づき、311地震の液状化発生地点(国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会, 2011; 若松, 2012), および今回改めて調査した結果(第2図, 第3図, 第4図および第1表)に基づき液状化発生率を計算した。第2図および第4図に最新の液状化発生地点を示す。なお、311地震については、海岸付近は津波により液状化の痕跡が明瞭ではない(または調査が十分ではない)ことから、津波被害エリアの微地形区分を除いて評価した。入力としての地震動強さの指標は、計測震度とし、地形・地盤分類250mメッシュマップ(若松・松岡, 2008)から推定した地盤の平均S波速度(V_s30)による地盤増幅率を考慮し、空間補間したものから地表の計測震度を求めている。一方、継続時間の考慮については、功刀ほか(2008)の「リアルタイム震度」を用い、液状化が発生する計測震度閾値を4.5として、その震度よりも大きくなる部分の面積(ΔI_s)を求めた。求めた面積を、液状化を発生させる継続時間とみなし、計測震度分布同様の手法で空間補間したものから各メッシュの ΔI_s を算出した。計算式を式(1)に示す。

$$\Delta I_s = \int_{t_0}^{t_a} (\Delta I - I_s) \cdot dt \quad (1)$$

ここで、 ΔI は時間震度、 I_s は計測震度の閾値を示す。計算結果と、各々の地震についての液状化発生率との比較を行った。使用した強震観測記録については、防災科研のK-NET, KiK-net, 気象庁, および自治体の震度計等の地震観測記録を筆者らが独自に収集しデータベース化したものを使用した。

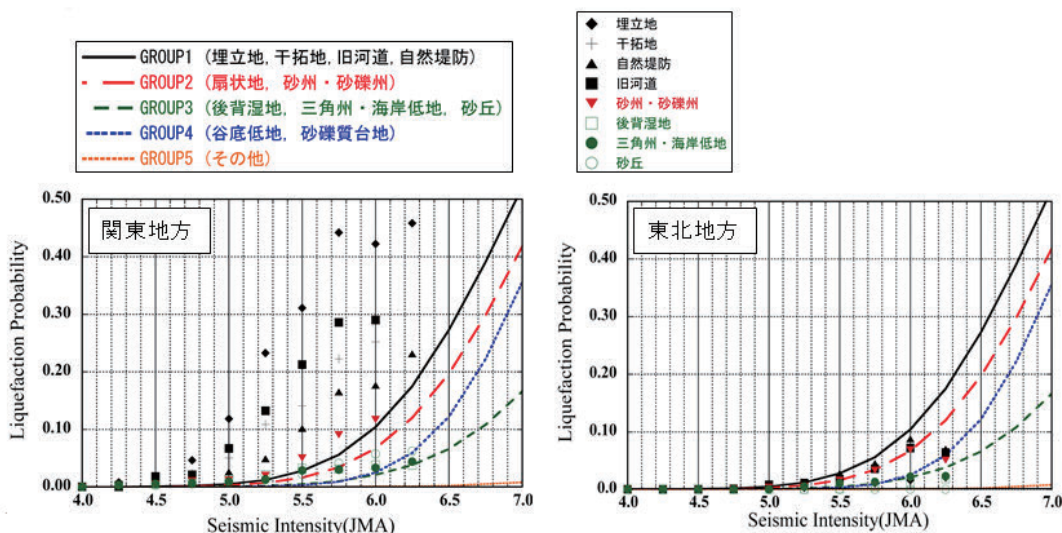
3. 液状化発生率と継続時間との関係

計測震度区分における液状化発生率(液状化メッシュ数/全メッシュ数)を各地震および微地形区分ごとに計算した。ここで、発生率とはメッシュ内で液状化が1ヶ所以上発生する割合を示す。なお、全メッシュ数が10個未満については、算出される発生率の信頼性が低いと考えて検討対象外とした。計測震度と液状化発生率の関係を比較した結果、埋立地・旧河道・干拓地については、松岡ほか(2011)の結果よりも発生確率が全体的に大きく、やや低震度から液状化が発生している。また、関東地方と東北地方を比べると、関東地方のほうがより発生率が大きく、東北地方の結果は相対的に小さくなっている(第5図参照)。

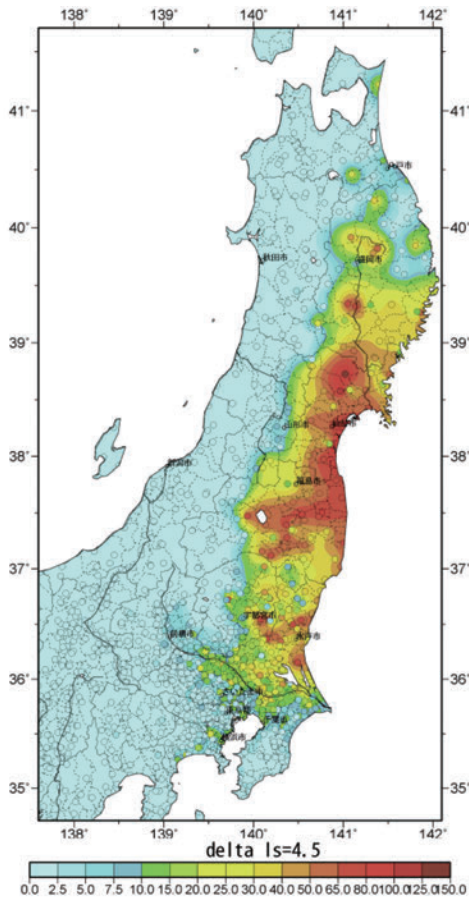
なお、第6図に ΔI_s ($I_s=4.5$)の空間分布を示す。継続時間(ΔI_s)の分布は、東北地方は非常に大きく、関東地域はそれに比べて小さいことがわかった。その結果、発生率と継続時間の関係を東北地方と関東地方で比較すると、関東地方の方が、より低震度・低継続時間で液状化が発生したということが明らかになった(第7図および第8図)。なお、1987年千葉県東方沖地震と比較しても、東北地方太平洋沖の関東地方との液状化発生率の比較において、大きな差がなく、継続時間が小さくても発生率が大きくなる傾向が見取れる(第8図)。

4. まとめ

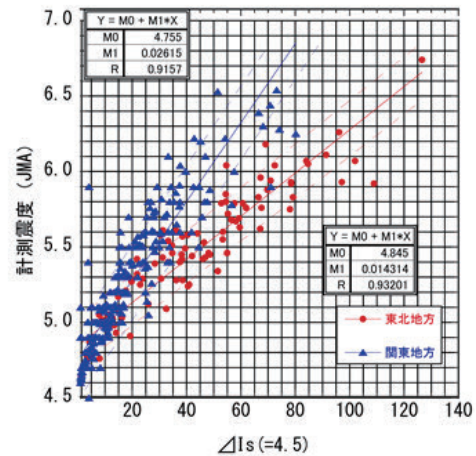
本研究では、311地震における、微地形毎の液状化発生率と計測震度および継続時間の関係を検討した。その結果、特に液状化が発生しやすい微地形において既往の結果よりも発生確率が大きくなり、強震動継続時間の大きさも液状



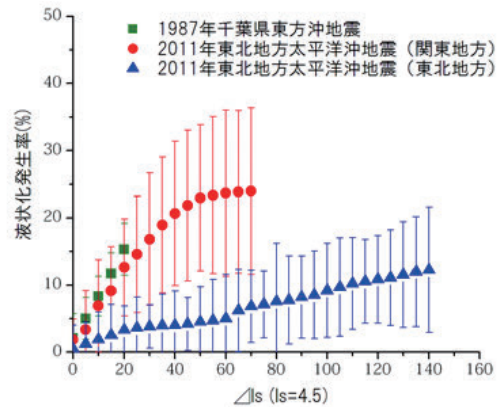
第5図 東北地方太平洋沖地震における関東地方の液状化発生率(左)と東北地方の液状化発生率(右)。



第6図 東北地方太平洋沖地震における継続時間を表す Δls ($ls=4.5$)の空間分布(右)。



第7図 東北地方太平洋沖地震における東北地方と関東地方の地震観測点における Δls 値と計測震度の関係(破線は $\pm 1\sigma$)。



第8図 各地震における Δls と液状化発生率との関係(エラーバーは $\pm 1\sigma$)。

化発生率に影響を与えることがわかった。液状化の発生率や強震動継続時間による液状化の発生状況は、東北地方と関東地方で大幅に異なることから、今後地域性を考慮した検討を行い、新しい液状化発生率の関係式とハザードマップの作成を試みる。

謝辞：各自治体における強震観測記録・液状化地点情報を提供していただいた関係者および機関各位に謝意を表する。

文献

国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会 (2011) 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明(報告書), http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043569.pdf (2013/10/13 確認)

功刀 卓・中村光洋・青井 真・森川信之・藤原広行 (2008) 地震瞬時速報システムのための強震観測記録. 地震, **60**, 243-252.

松岡昌志・若松加寿江・橋本光史 (2011) 地形・地盤分類250 mメッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法. 日本地震工学会論文集, **11**, no. 2, 20-39.

先名重樹・長谷川信介・前田宜浩・藤原広行 (2012) 東北地方太平洋沖地震における利根川流域の液状化被害. 日本地震工学会論文集, **12**, no. 5 (特集号), 146-165.

鈴木 亘・青井 真・関口春子・功刀 卓 (2011) 2011年東北地方太平洋沖地震の震源破壊過程. 防災科学技術研究所主要災害調査報告「東日本大震災調査報告」, 53-62.

若松加寿江 (2012) 2011年東北地方太平洋沖地震による東北地方の液状化地点の地形・地盤特性. 第47回地盤工学研究発表会発表論文集, 1505-1506.

若松加寿江・松岡昌志 (2008) 地形・地盤分類250 mメッシュマップ全国版の構築. 日本地震工学会大会-2008梗概集, 222-223. (デジタルデータは<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> 2013/10/13 確認)

安田 進 (2011) 東京湾岸における液状化被害. 地盤工学誌, **59**, no. 7, Ser. no. 642, 38-41.

SENNA Shigeki (2013) Relationship between liquefaction occurrence ratio and strong ground motion duration for The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.

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り組み

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

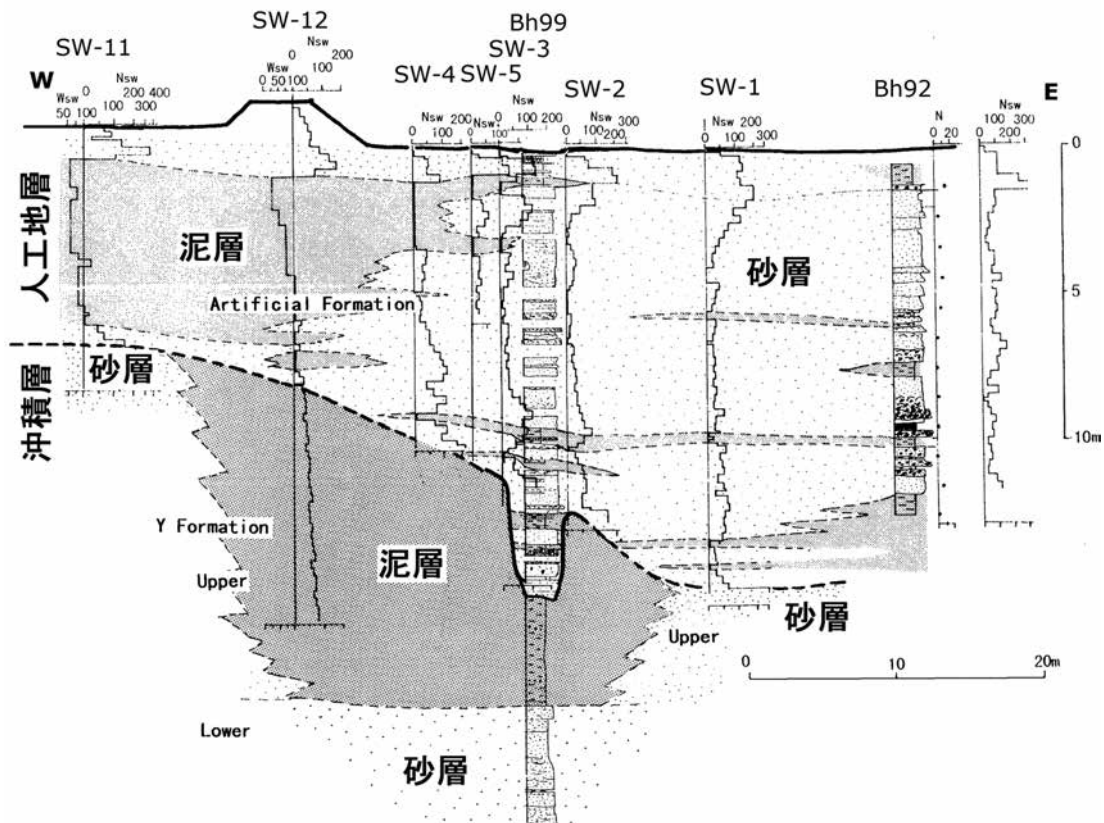
千葉東方沖地震時に液状化 – 流動化現象が発生した場所でのメカニズム解明例を以下に紹介する。

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



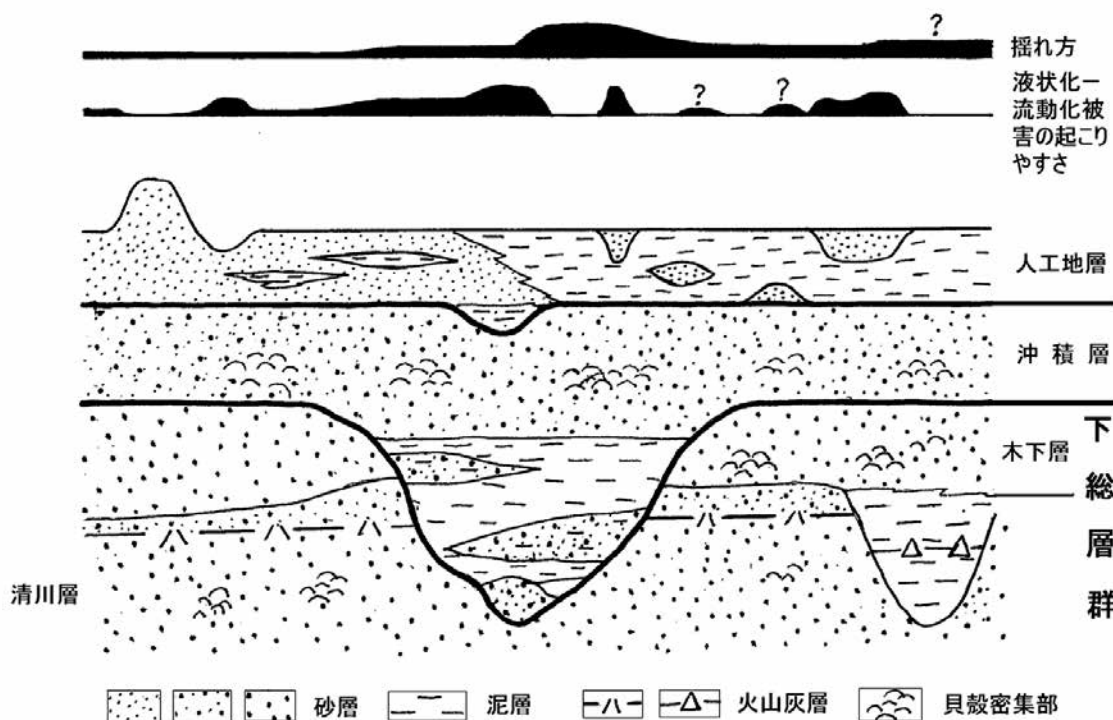
第1図 千葉市美浜区中磯辺公園の地質断面 (風岡ほか, 2000 に加筆). Bhはオールコアボーリングのデータ. SWはスウェーデン式サウンディング試験のデータ.

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/siryou/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班体制で、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のみられ、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－流動化現象があったところでは、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）

液状化しやすい地質特性の解明

—利根川下流域を対象とした産総研でのとりくみの紹介—

水野清秀¹⁾

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震およびその余震によって、関東平野東部の利根川下流域では、広く液状化の被害が発生しました。この地域では、特にかつての旧河道や湖沼の一部を埋め立てたところに多くの被害がみられます(国土交通省関東地方整備局・公益社団法人地盤工学会, 2011; 小荒井ほか, 2011; 千葉県環境研究センター, 2011; 長谷川ほか, 2012など)。

液状化が生じやすい条件として、①ゆる詰め(ゆるみ)の砂層があること、②地下水位が浅いこと、③強い揺れ(地震動)があること、などが指摘されています(たとえば、國生, 2009; 風岡, 2012)。産業技術総合研究所(以下、産総研)では、平成23年度第三次補正予算を用いて、利根川下流域において、液状化が生じた地点、あるいは液状化が生じなかった地点を構成している地層の特性がどのようなものであるのかを明らかにするために、さまざまな地質調査を行いました。この調査は、また、地層の液状化-流動化被害調査に対して長年の実績を持つ千葉県環境研究センターの方々との共同研究として実施しました。これまでの調査結果の概略は、水野ほか(2013)にまとめられています。本稿では、この報告書に記載したことを中心として、調査結果の概要を述べます。

なお、本稿の内容は、産総研内の分担した研究者と千葉県環境研究センターの風岡 修博士をはじめとする多くのの方々、さらに福岡大学の石原与四郎博士らとの共同の成果です。また、調査の実施にあたって、地元自治体の茨城県潮来市、稲敷市、千葉県香取市、^{こうざき}神崎町からは全面的なご協力をいただくと共に、地震被害資料や既存ボーリング資料のご提供をいただきました。本稿作成にあたり、産総研の石原武志博士には、図の作成をお願いしました。これらの方々には深く感謝申し上げます。

2. 調査の内容

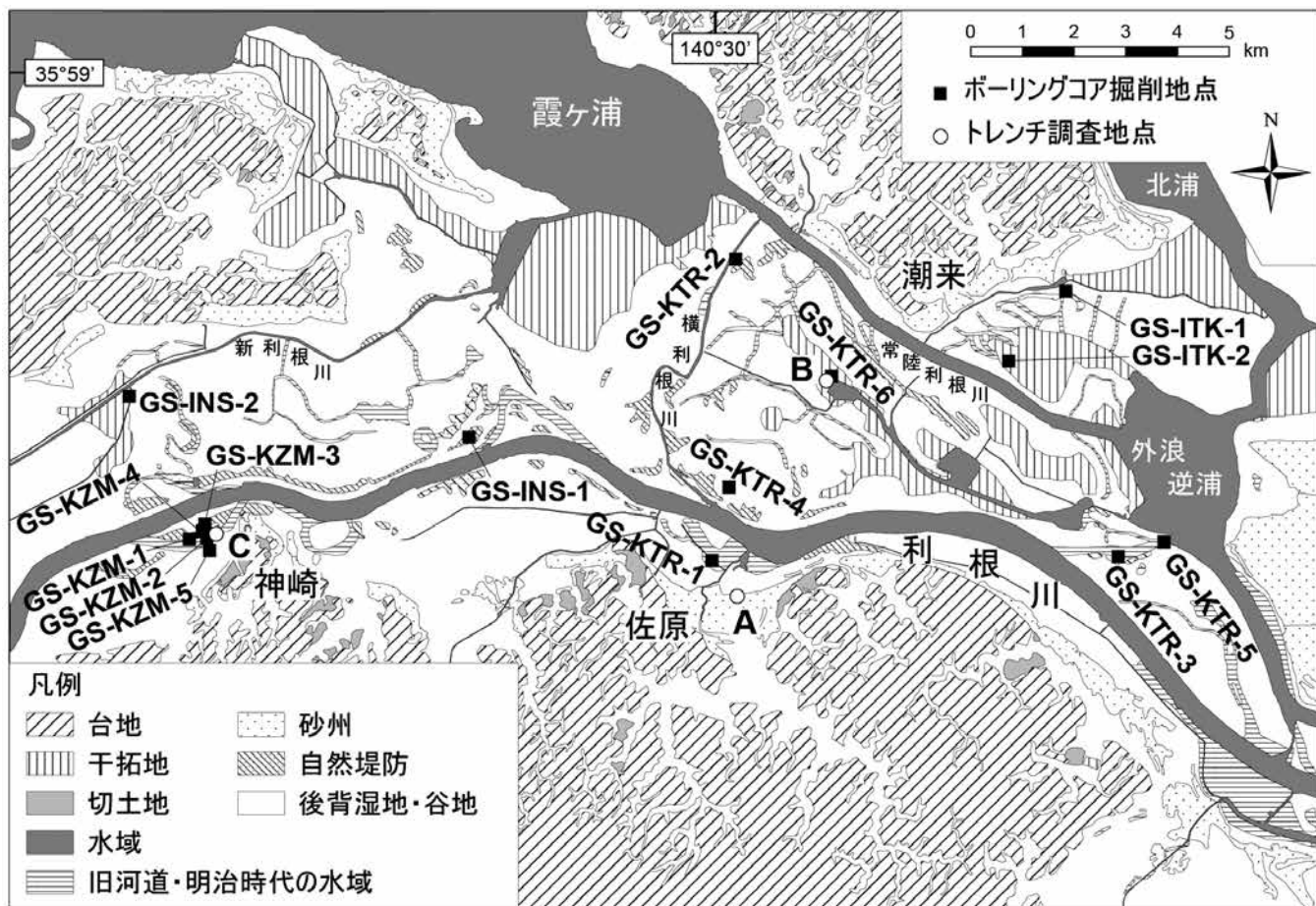
調査範囲は、神崎町、稲敷市から潮来市、香取市にかけての利根川下流域、常陸利根川流域の低地です(第1図)。この範囲内の15地点で、沖積層を対象にした深度10~60mのオールコアボーリング調査を実施し、あわせて標準貫入試験、速度検層・電気検層なども行いました。採取したコアに対しては、層相記載、粒度分析、コアの軟X線・CT撮影、剥ぎ取り標本の作成、年代測定、花粉・珪藻・火山灰分析などを行い、液状化-流動化跡の検出やその形成年代、堆積物の年代や特性などについて調べました。また、2011年東北地方太平洋沖地震に伴い、地表に噴砂が生じた2地点と噴砂が認められなかった1地点に対して、トレンチ掘削調査を実施し、噴砂の供給源、堆積・流動構造などを観察しました。一方、収集した既存ボーリング資料約3,000点の解析を行い、液状化しやすい地域の地質特性を三次元的に検討しました。また、地下水位・水質についても調査を行いました。

3. ボーリング調査結果

ボーリングコアの解析からは、2011年東北地方太平洋沖地震時に噴砂がみられた地点のいくつかでは、比較的浅い深度の砂層中に、噴砂脈とみられるものや液状化-流動化によるとみられるラミナなどの初生的な堆積構造の消失などが観察されました。それらの地層は、*N*値が概ね20以下で、年代測定などの結果でおよそ1,000年前以降の歴史時代に堆積した砂層(深度は概ね10m以内)と、人工的に埋め立てた砂層です。自然の堆積層中にみられる液状化跡の形成年代については、まだ正確に求められていません。その理由は、噴砂脈が地表まで達するとは限らず、途中で止まったり消失することがあること、また液状化が当時の地表下のどの深さにまで及ぶのかということが十分にわかっていないためです。今年度の補足調査では、調査範囲をより上流側に移して、液状化した砂層の堆積年代の下限、液状化層がみられる深度の下限について検討している

1) 産総研 地質情報研究部

キーワード: 液状化層, 利根川下流域, ボーリング調査, トレンチ調査, 2011年東北地方太平洋沖地震



第1図 調査地域の地形分類とボーリング・トレンチ調査地点 (水野ほか, 2013を一部修正)。

ところですが、なお、このように液状化跡を検出できるのは、コアを乱さずに採取できたからであり、不擾乱のコア採取を行わない標準貫入試験を主体とする従来の調査法では、このような見方はできません。

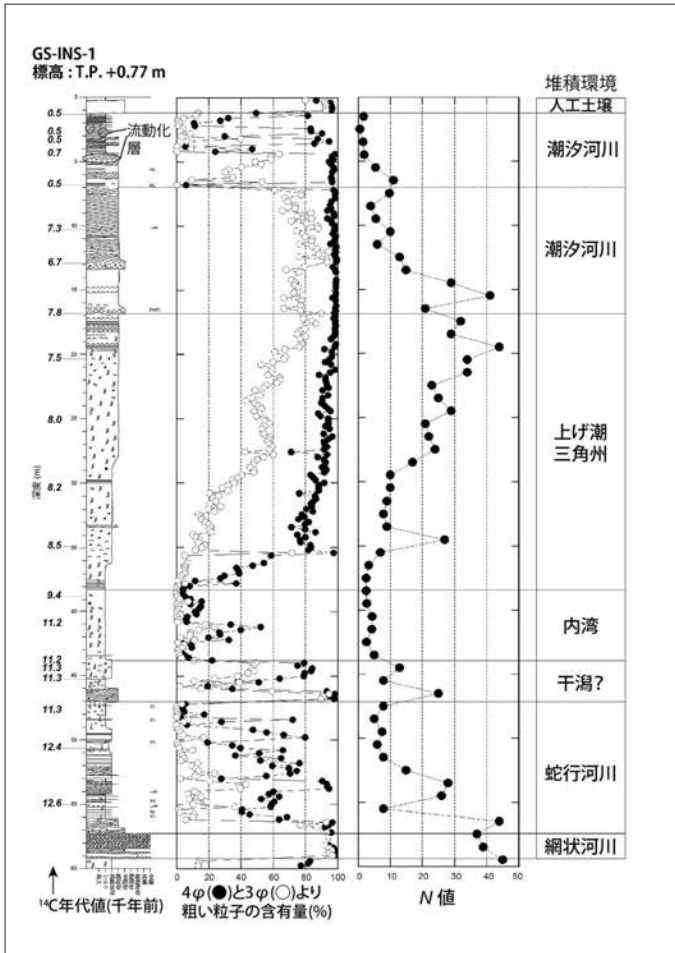
既存のボーリング資料の解析結果によると、現在の利根川に沿った地域と霞ヶ浦の南に位置する横利根川沿いの地域に、深度10 m程度までの範囲で比較的広く砂層主体の地層が分布しています。この範囲には2011年の地震で液状化被害が多く発生していますが、埋め立て層だけではなく、自然地盤の液状化も生じた可能性が高いと考えられます。たとえば、2011年の地震による噴砂がみられた稲敷市内のボーリングコア(第2図)では、地表下1.2 mほどが埋め立てた砂層ですが、その下位の自然堆積した砂層中に、砂脈や流動化した構造がみられます。

上述のボーリングコアでは、さらに深いところにも沖積層の砂主体層はみられますが、液状化跡とみられるものはほとんど観察されていません。その堆積年代は概ね4,000年前以前の値を示しています。また、これらの地層には一般に生痕や貝化石を含むことが多く、N値は20以上を示

すことが多いのですが、泥混じりのところでは20未満の値を示すこともあります(第2図)。明治時代の地形図で湖沼として表現されているところを埋め立てたボーリングの資料では、埋め立てた人工地層より下位には、一般にN値が5未満で、4,000年前より新しい時代の泥層が堆積していますが、それらには液状化跡はみられません。

4. トレンチ調査結果

トレンチ調査のうち2ヶ所(第1図のB, C)は、かつての河道あるいは湖沼だったところを昭和30年代および40年代に浚渫土砂で埋め立てた地点で、2011年東北地方太平洋沖地震時に噴砂が生じています。地下水位が高いために、掘削地点の周囲を矢板で囲い、その中をウェルポイント工法によって地下水位を下げた後、掘削を行いました(第3図)。また、主な壁面には樹脂を塗って表面の剥ぎ取り標本を作製し、後ほど液状化による流動構造などを詳しく観察できるように保存をしました(第4図)。この剥ぎ取り標本の一つは現在産総研の地質標本館に展示



第2図 ボーリングコアの柱状図と分析値の一例（水野ほか，2013を一部修正）。

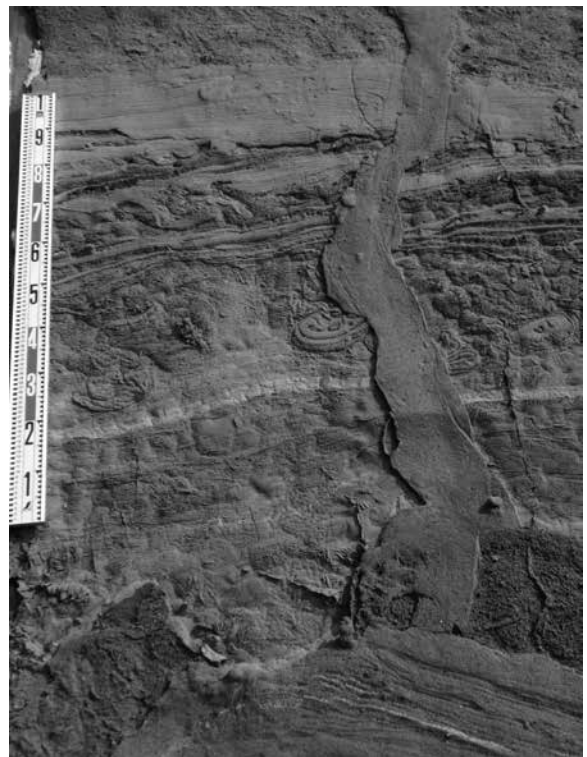
されていて、観察することができます。

浚渫砂層には、部分的に液状化しているところとしていないところがみられ、液状化が進んだ部分は堆積構造が不明瞭になっていました（第5図）。また噴砂脈にはその砂層中から発生しているのがみられ、周囲の泥質層の一部を巻き込んでいたり、地表まで達しているものには、その後表層を構成している碎石が砂脈内に落ち込んでいたりするものが観察されました（第6図）。また、液状化した砂層が上位の泥質層を突き破れずに、泥質層の下底面で側方にシート状に広がっているものもみられました（第7図）。このような液状化-流動化の構造については、現在さらに詳しく記載をしているところです。

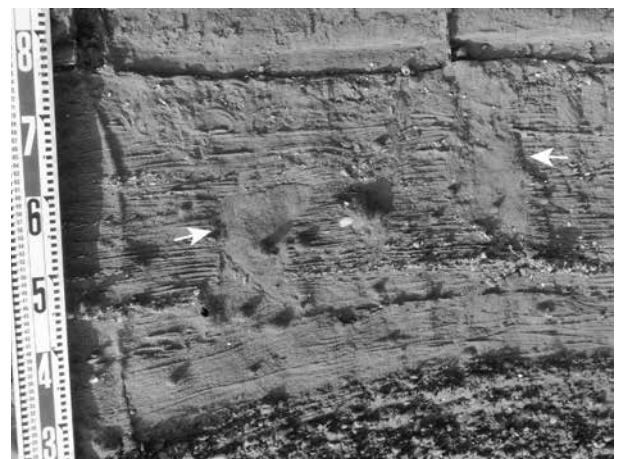
もうひとつのトレンチ調査は、沖積低地からわずかな高まりをなす砂州上（第1図のA）で行いました。砂州上には香取や潮来などの昔からの集落が発達していて、またこの面上にいくつかの古墳が分布しています。2011年の地震時には、液状化被害はほとんど報告されていません。トレンチの深さは1.2 mほどで、下底付近に地下水水面があります。砂州を構成する地層は細礫混じりの淘汰の良い砂層



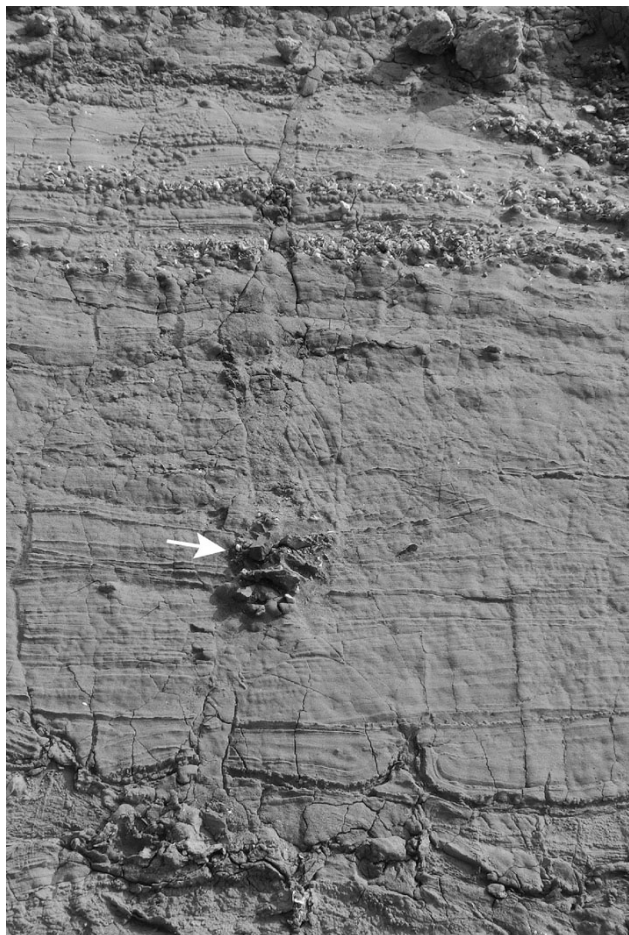
第3図 周囲を矢板で囲ったトレンチの全景（第1図のB地点）。



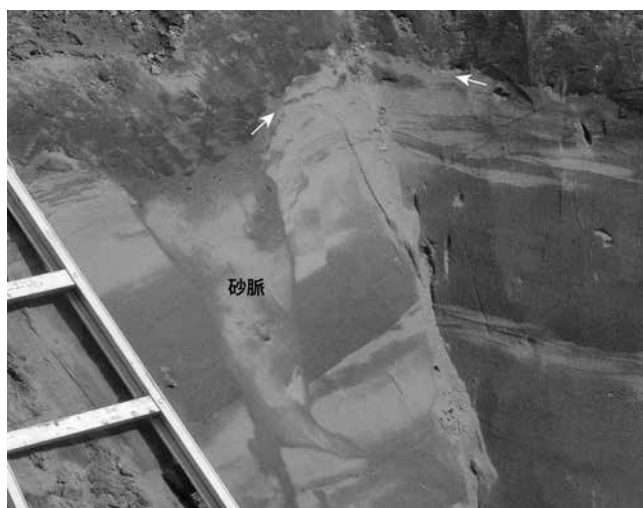
第4図 砂脈を含む地層の剥ぎ取り標本の例。



第5図 浚渫砂層の一部が液状化して堆積構造が消失している部分（矢印の2ヶ所）を示す剥ぎ取り標本。



第6図 砂脈中に地表から落ち込んだ砕石礫（矢印）がみられる剥ぎ取り標本。砕石の大きさは約5 cm.



第7図 泥質層の下底面でシート状に広がっている砂脈（矢印の位置）。

で、トレンチ内では液状化跡はみられず、地下水面付近では固結度は低いのですが、上部では鉄分が沈着して固くなっていました。さらに上位には、厚さ50 cmほどの土壌層が覆っていました。地下水位がやや深いことと、上部の固くしまった地層の存在が地表付近に液状化被害が生じなかった理由の一つと思われますが、さらに検討を進めています。

文 献

千葉県環境研究センター（2011）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.

長谷川信介・前田宜浩・河合伸一・内藤昌平・岩城麻子・はお憲生・森川信之・東 宏樹・先名重樹（2012）2011年東北地方太平洋沖地震による利根川流域の液状化被害．防災科学技術研究所主要災害調査，no. 48，121-134.

風岡 修（2012）地震時の液状化—流動化現象および地波現象とその実態．地質調査総合センター研究資料集，no. 552，12-29.

小荒井 衛・中埜貴元・乙井康成・宇根 寛・川本利一・醍醐恵二（2011）東日本大震災における液状化被害と時系列地理空間情報の利活用．国土地理院時報，no. 122，127-141.

国土交通省関東地方整備局・公益法人地盤工学会（2011）東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書．65p.

國生剛治（2009）液状化現象—巨大地震を読み解くキーワード—．鹿島出版会，東京，308p.

水野清秀・風岡 修・田辺 晋・宮地良典・石原与四郎・安原正也・小松原純子・中島善人・小松原 琢・石原武志・稲村明彦・吉田 剛・香川 淳・森崎正昭・野崎真司・菅野美穂子・古野邦雄・酒井 豊・木村満男・古賀千裕（2013）地形および地質学的手法による液状化調査．地質分野研究企画室（編），巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究中間報告，地質調査総合センター速報，no. 63，179-205.

MIZUNO Kiyohide (2013) Geological properties of the liquefied layers in the downstream of the Tone River investigated by GSJ, AIST.

（受付：2013年10月10日）

利根川下流域における液状化被害地域の 物理探査・原位置試験調査 —液状化調査技術の新展開—

神宮司元治¹⁾・光畑裕司¹⁾・横田俊之¹⁾・中島善人¹⁾

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災において、利根川下流域や東京湾沿岸では深刻な液状化被害が発生した。液状化被害は関東を中心に広範囲の地域に及び、その規模や深刻さから我が国最大級の液状化被害となった。震災後は、各自治体を先頭に被災状況の実態調査や大学・研究機関による液状化被害の分析調査が行われ、今回の震災被害が主に、旧河川や湖沼跡、埋め立て造成地などの人工改変地域で多く発生していることが判明した。その一方で、埋め立て年代や造成法、地質構造や地下水位に由来するとみられる液状化被害の差異も被災地の中で散見された。東日本大震災の地震被害は、被害の大きさから世界中の関心を集めたため、世界大手の地図情報サービス企業が被災直後から集中的に高分解能の衛星画像を収集しており、今現在も、被災時の地表噴砂の状況等をGoogle Earthなどインターネット上で確認することができる。また、明治初期から中期にかけて関東地方で作成された「迅速測図」なども、インターネット上で公開されており（農研機構, 2013）、実際の被災の状況と過去の地形との関係なども比較することができる。さらに、多くの自治体によって、液状化被害の詳細なデータが得られており、液状化被害の詳細を知ることにも可能である。

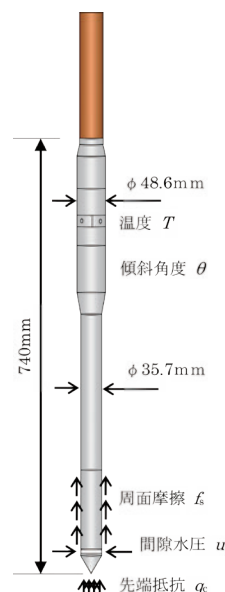
（独）産業技術総合研究所（以下、産総研と呼ぶ）では、被災地の復興計画や今後予測される大地震による液状化被害の対策のため、利根川下流域の実際に液状化被害が発生した地域において、被災状況と地質構造の関連性に着目した調査を行った。また、物理探査（主に地表から非破壊で地下を調査する技術）・原位置試験調査技術（地盤サンプルを取得せずに地下を調査する技術）を応用した新しい液状化調査技術の研究開発と適用性調査を行った。

2. 利根川下流域で実施した原位置試験調査

産総研では、液状化被害が発生した利根川下流域において、液状化被害の程度や地質的条件が異なる調査地点を選択し、一般的なボーリング調査から最新の液状化調査技術まで様々な調査を行った。ここでは、今回の調査で実施した原位置貫入試験および物理探査手法とその適用調査結果の一部について紹介する。

2. 1 三成分コーン貫入試験

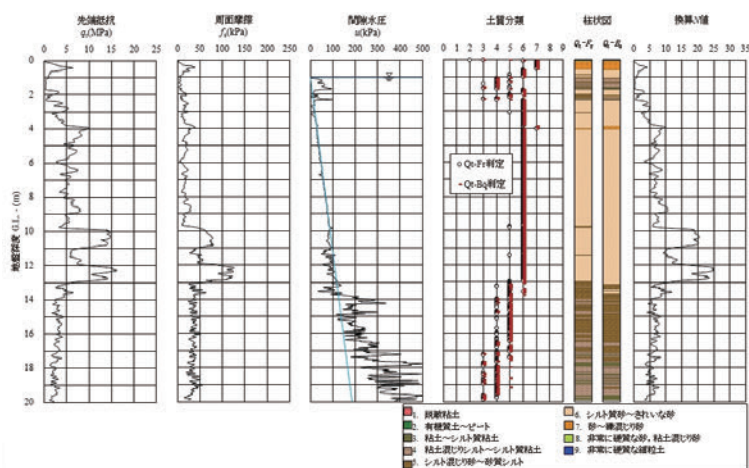
原位置コーン貫入試験の中でも、三成分コーン貫入試験は、わが国だけでなく国外でも普及している原位置試験方法である（高田ほか, 2008）。三成分コーン貫入試験は、第1図に示すようなプローブを、油圧ジャッキを用いて、一定速度で地盤中に貫入させることにより、先端抵抗・周面摩擦・間隙水圧のデータから、深度方向の地盤パラメータを取得する。三成分コーン貫入試験では、ボーリング調査のように地盤サンプルを取得する必要なく地盤の細粒分含有率の推定や地盤の判定が可能である。また、深度分解能も高く、2 cmごとの細かい深度毎の計測が可能であり、標準貫入試験では困難な薄い地層の検出も可能である。



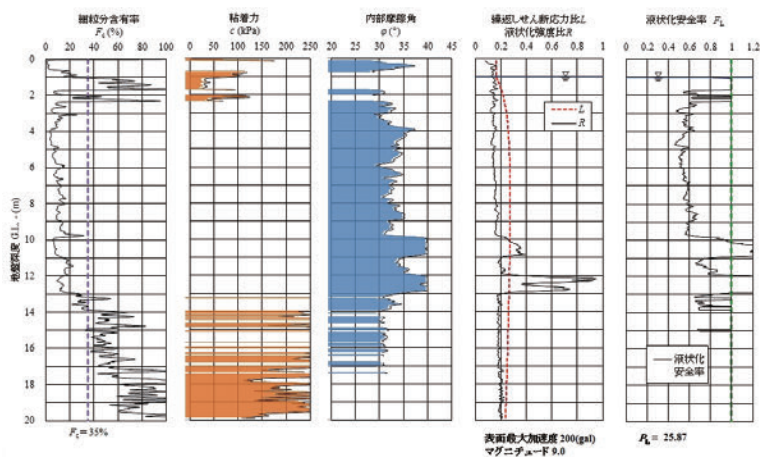
第1図 三成分コーンの模式図。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード：液状化, 物理探査, 原位置試験, CPT, VPT



第2図 三成分コーン貫入試験の試験結果.



第3図 大規模な噴砂が生じた地点における三成分コーンによる液状化判定結果.

ここで、三成分コーン貫入試験によって得られた試験結果の一部を第2図に示す。測定地点は、茨城県神崎町内の非常に激しい液状化被害が発生した地点で、大規模な噴砂が認められている。また、産総研で実施したトレンチ掘削の結果からも液状化の痕跡をとらえることができた地点でもある。また、これらの三成分コーン貫入試験の結果から土質パラメータを推定し、液状化判定を行った結果を第3図に示す。

液状化判定は、建築基礎構造設計指針（日本建築学会，1988，p. 67-71）に準拠した方法で行われ，東日本大震災における現地の地表面推定加速度を200 gal，地震規模をマグニチュード9.0として算定した。液状化判定結果を示す液状化安全率（FL）値は，深度約10m以浅で1を下回っており液状化の危険度が高いことを示している。

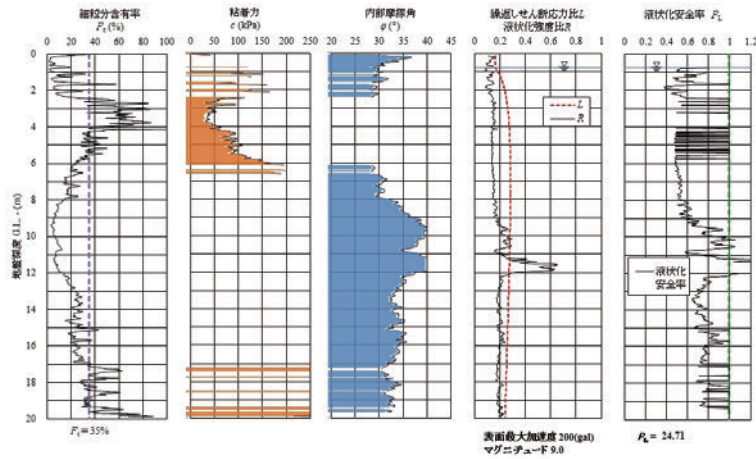
また，深度毎の液状化安全率（FL）に深さ方向に重みをつけて足し合わせた値である液状化危険度（PL）は，25.87という値を示しており，これは，第1表に示す判定

基準（岩崎ほか，1980）を考慮しても極めて高い危険度であると言える。

今回の調査では，液状化被害が発生した地点のほぼ全てで，三成分コーン貫入試験による液状化危険度は5を上回ったが，その一方で実際に液状化被害が見当たらない，もしくはほとんど痕跡がない地点においても，少なからず高い危険度を示す地点が存在した。第4図は，先ほどの神崎町の旧河川跡の液状化発生地点から300mほど北の調査地点における液状化判定結果である。この地点は，地震直後の衛星画像でも噴砂等の液状化被害の痕跡は見当たらず，現地の構造物等を見ても被害が見当たらない場所である。この地点の液状化危険度（PL）は，先ほどの地点とほぼ匹敵する24.71という高い値を示しているが，実際の被害状況は大きく異なる。このように，液状化危険度が高いと判定されたにも関わらず，実際の液状化被害が不明瞭，もしくは，さほど大きくない事例が少なからず存在した。土木研究所が震災後に実施した調査結果（土木研究所，

第1表 液状化危険度判定.

	$P_L=0$	$0 < P_L \leq 5$	$5 < P_L \leq 15$	$15 < P_L$
P_L 値による液状化危険度判定	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は不要。	液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対してより詳細な調査が必要。	液状化危険度が高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。	液状化危険度がきわめて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。

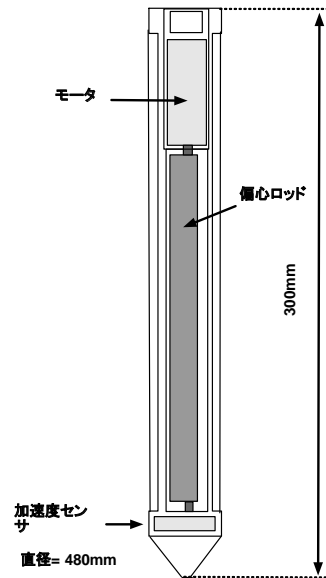


第4図 液状化の痕跡が見られない地点における三成分コーンによる液状化判定結果.

2011)においても、FLおよびPLによる液状化判定結果がかなり安全側（危険度が高い方向を示す）を示す傾向があると指摘されており、本調査の結果も同様の結果を示していると考えられる。

2.2 バイプロコーン貫入試験

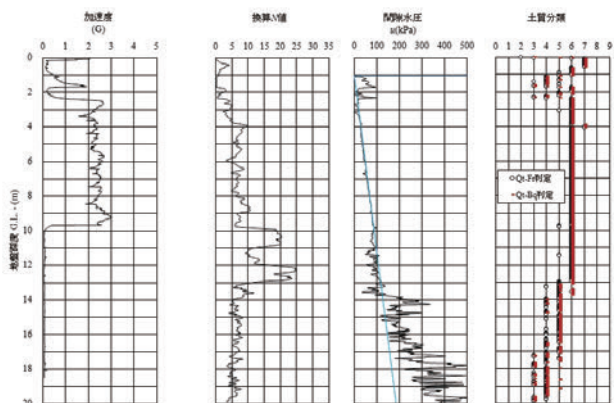
標準貫入試験や三成分コーン貫入試験などの方法は、地盤の強度や細粒分の含有率などの地盤パラメータから液状化の発生を予測する、いわゆる静的な方法である。これに対して、地盤サンプルの振動台試験や爆薬を用いた人工地震による試験方法は、地盤に人工的に振動や衝撃を加えることによって液状化が発生するか確かめる動的試験方法である。これらの方法の一つとして、産総研がこれまで研究開発を行ってきたバイプロコーン貫入試験がある (JINGUJI *et al.*, 2006)。バイプロコーン貫入試験は、加速度・比抵抗・間隙水圧の各センサおよび振動機構を内蔵したプローブを用いて、その振動機構によって地盤を強制的に液状化させ、液状化した地盤の動的な応答を各センサで計測する試験方法である。これまで、本貫入試験は加速度センサ・比抵抗・間隙水圧の3つのセンサを用いて、特定深度での状態変化の計測を段階的に行ってきたが、今回の調査においては、応答の早い加速度センサに絞り、連続測定が可能ないように改良したプローブを用いて調査を行った。第



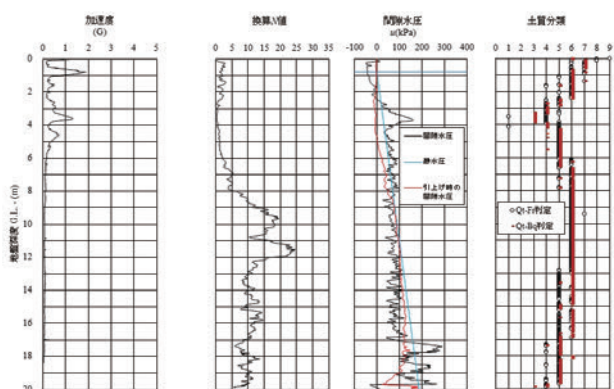
第5図 バイプロコーンの模式図.

5図に今回の調査に使用したプローブの模式図を示す。

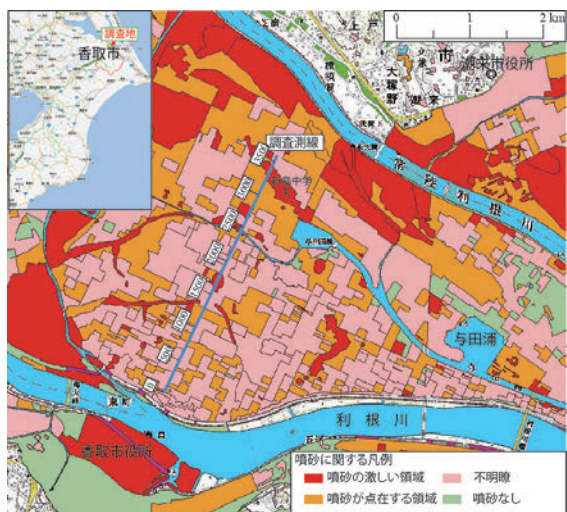
バイプロコーンは、三成分コーン貫入試験と同様に貫入試験機の油圧ジャッキによってプローブを地盤中に貫入させるが、測定は引き抜き時に行う。ここで、第6図および第7図に、三成分コーン貫入試験を実施したそれぞれの地点で同時に実施したバイプロコーンの結果を示す。バイプロコーン内部の偏心ロッドで発生した振動力は、地盤の剛



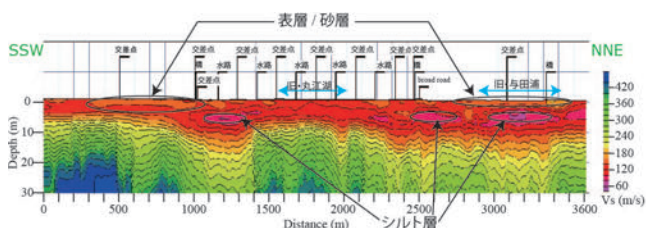
第6図 大規模な噴砂が生じた地点におけるパイプロコン貫入試験結果.



第7図 液状化の痕跡が見られない地点におけるパイプロコン貫入試験結果.



第8図 表面波探査測線 (神宮司ほか, 2013).



第9図 表面波探査によって得られた速度構造図 (神宮司ほか, 2013).

性が高い場合は、プローブの振動が小さいため、プローブの加速度は小さくなる。その一方で、地盤の液状化が発生した場合は、地盤の剛性が失われ、液体のような状態になるためプローブの加速度が大幅に増加する。

空气中で振動させた場合のプローブの最大加速度は、約2Gであるが、第6図の地点の加速度は、深度2mから10mで2Gに達しており、この地層内で液状化により剛性が大幅に失われていることが考えられる。その一方で、第7図の地点の加速度は、第6図の地点の加速度に比べて大幅に小さく、地盤の動的な剛性が高いことがわかる。この差は、三成分コーン貫入試験では、明確に得られることができなかった差異であり、三成分コーン貫入試験とパイプロコン貫入試験を合わせて実施することによって、より高精度の液状化判定が可能になると考えられる。

3. 物理探査による液状化調査

弾性波探査や電気探査といった物理探査方法では、地表から比較的広域の地下構造を調査することができる。産総研では、これらの調査手法を用いて、液状化発生地点の地質的特徴を調べる調査を実施した。

写真1に示すのは、地盤の速度構造を地表から調査する表面波探査と言われる物理探査手法の一つである。

写真1中の(a)に示すのが震源で、(b)が計測するセンサである。今回の調査では、ランドストリーマという牽引帯の上に地震計を並べ、そのランドストリーマを車両で牽引しながら調査を実施した。測線は、香取市新島中学校近辺をほぼ南北に横断する道路である。

測線上には、噴砂の激しい領域が点在しており特に香取市新島中学校の周辺では、特に大規模な噴砂が確認できた。ここで、第8, 9図に表面波探査によって得られた速度構造図と地形的特徴を併記した図を示す。一般的に、地盤中の地震波(表面波)の速度は、地盤の密度が高いほど速くなるが、旧与田浦があった近辺や旧河川にあたる大規模な噴砂が生じた地点で、速度の遅いシルト層の存在が推定される。砂層に比べて透水性の低いシルト等が存在する場合、その上位の水位が浅くなる可能性があり、それが原因で激しい液状化が発生した可能性も考えられる。

4. まとめ

東日本大震災では、非常に甚大な液状化被害が発生した。そして、様々な液状化発生地点の地域的特徴や地質的特徴

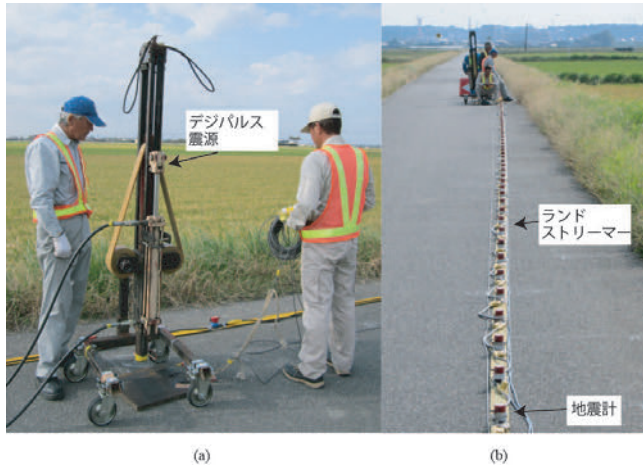


写真1 ランドストリーマーを用いた表面波探査 (神宮司ほか, 2013).

と被害との関係の検討が行われた。産総研では、これらの被災地において、物理探査・原位置試験調査技術を用いた調査手法を適用し、実被害との比較検討を行った。その結果、三成分コーン貫入試験といった最新の既存調査手法の適用においても、いくつかの問題点が残ることが明らかになった。また、同時に、これまで研究開発を行ってきたバイブロコーンなどの新しい調査手法の有効性を示すことができた。これらの成果によって得られた最新の知見と技術は、今後の被災地の復興と全国的な液状化被害の防止に貢献すると考えられる。

文 献

土木研究所 (2011) 東北地方太平洋沖地震における液状化の発生を踏まえた液状化判定法の検証, <http://www.pwri.go.jp/team/smd/pdf/hanteihou.pdf> (2013/10/11 確認)

岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進 (1980) 地震時地盤液状化の程度の予測について. 土と基礎, 128, no. 4, 23-29.

JINGUJI, M., TOPRAK, S. and NAKASHIMA, Y. (2006) Development of vibration penetration test (VPT) and results of laboratory and field experiments. *Proceedings of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, no. 896.

神宮司元治・横田俊之・光畑裕司 (2013) 物理探査および原位置地盤計測による液状化評価. 地質分野研究企画室 (編), 巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究中間報告, 地質調査総合センター速報, no. 63, 207-222.

日本建築学会 (1988) 建築基礎構造設計指針. 430p.

農研機構 (2013) 関東平野 / 歴史的農業環境WMS配信サービス, <http://www.finds.jp/wsdocs/hawms/kanto/index.html.ja> (2013/10/11 確認)

高田 徹・関 平和・松本樹典・藤井 衛・松本克也・佐藤 隆 (2008), 三成分コーン貫入試験による宅盤の評価手法に関する考察. 地盤工学ジャーナル, 4, no. 2, 157-170.

JINGUJI Motoharu, MITSUHATA Yuji, YOKOTA Toshiyuki and NAKASHIMA Yoshito (2013) Geophysical exploration and in-situ investigation of liquefaction affected area along Tone River—the new method of the assessment of soil liquefaction potential—.

(受付: 2013年10月11日)

◆ 編集後記 ◆

今月号は、産業技術連携推進会議知的基盤部会地質地盤情報分科会の講演会「東日本大震災による液状化被害と地質地盤情報の活用」の特集号で、12月6日の講演会当日に配布される講演予稿集も兼ねています。今回は原稿の大部分を産総研外部の方をお願いしており、講演会当日までに印刷ができるように編集スケジュールを早めるなど、関係者の方々にはたいへんご協力いただきました。ここに記して謝意を表します

(12月号編集担当: 下川浩一)

GSJ 地質ニュース編集委員会

委員長 利光誠一
副委員長 金井 豊
委員 佐藤隆司
杉原光彦
中嶋 健
七山 太
森尻理恵
牧本 博
渡辺真人
宮内 涉
デザイン
レイアウト 菅家亜希子

事務局

独立行政法人 産業技術総合研究所
地質標本館

TEL : 029-861-3687

E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

<http://www.gsj.jp/publications/gcn/index.html>

GSJ 地質ニュース 第2巻 第12号
平成25年12月15日 発行

独立行政法人 産業技術総合研究所
地質調査総合センター
〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1
つくば中央第7

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

印刷所 朝日印刷株式会社

© 2013 産総研 地質調査総合センター
<http://www.gsj.jp>

GSJ Chishitsu News Editorial Board

Chief Editor: Seiichi Toshimitsu
Deputy Chief Editor: Yutaka Kanai
Editors: Takashi Satoh
Mituhiko Sugihara
Takeshi Nakajima
Futoshi Nanayama
Rie Morijiri
Hiroshi Makimoto
Mahito Watanabe
Wataru Miyauchi
Design &
Layout Akiko Kanke

Secretariat

National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology
Geological Survey of Japan
Geological Museum
Tel : +81-29-861-3687
E-mail : g-news-ml@aist.go.jp

GSJ Chishitsu News Vol.2 No.12
Dec. 15, 2013

National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology
Geological Survey of Japan
AIST Tsukuba Central 7, 1-1, Higashi 1-chome
Tsukuba, Ibaraki 305-8567 Japan

All rights reserved

Asahi Printing Co., Ltd

© 2013 Geological Survey of Japan, AIST
<http://www.gsj.jp>

