

東日本大震災に関連した地盤液状化リスク調査・評価研究の概要 Summary of investigation and evaluation study on liquefaction risk in the 2011 Great East Japan Earthquake disaster

光畑裕司^{1*}・水野清秀²・神宮司元治¹・松岡昌志³
Yuji Mitsuhata^{1*}, Kiyohide Mizuno², Motoharu Jinguuji¹ and Masashi Matsuoka³

Abstract: In the Great East Japan Earthquake Disaster due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake generated on March 11 2011, large-scale ground liquefaction occurred in the Kanto district 300-400km away from the epicentral area. In particular, the liquefaction damage heavily concentrated at reclaimed lands, old pond and marsh, old river channels in such as the downstream Tone River area and Urayasu area along the Tokyo Bay. We have carried out many and various field investigations on liquefaction in the downstream Tone River area as one of research subjects of Evaluation of multiple geological risk for giant earthquakes and tsunamis. The investigations and evaluation study are composed of three tasks: geomorphological and geological investigation by boring and trench excavation surveys, investigation by geophysical and in-situ exploration techniques such as ground penetration radar and cone penetration test, and development of quick estimation system for liquefaction potential. The results of these investigations are reported in this issue. The related data and maps obtained in our study will be open in our website in near future.

Keywords: Great East Japan Earthquake Disaster, Liquefaction, downstream Tone River area, geomorphological and geological investigation, geophysical and in-situ exploration technique, quick estimation system, liquefaction potential

1. はじめに

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い各地で大規模な地盤液状化が発生した。関東地方では、茨城県36市町村、千葉県25市町、東京都11区などで96市町村で液状化被害が報告され(国土交通省関東地方整備局・地盤工学会, 2011), その内、浦安市に代表される東京から千葉にかけての東京湾沿岸, そして茨城県と千葉県の県境付近にわたる利根川下流域等, 埋め立て地や旧池沼や河道において液状化被害が集中した(第1図)。液状化被害は津波や地震災害のように人命に即座に関わるような被害ではないものの, 住宅地や道路・配管等のインフラ施設の損壊(第2図), そして沿岸部の石油コンビナートへの影響等被害が広範囲に及び火災の発生に至る危険もある。

地盤の液状化とは(前野, 2009), 水分を多く含み, 緩く詰まった砂地盤が, 地震により激しく揺れ, 砂粒同士の緩いかみ合わせが離れて砂粒がバラバラになり, 砂粒が水中に浮いたような状態となり, 水と砂が一体となった比重の重い液体と同じような性質となる現象である(第3図)。そのため軽い物は浮かび上がり, 重い物は沈み込み, それが不均質に発生し, 構造物は傾いてしまう(不同沈下)。また砂粒はより密で安定になろうとするため, 隙間にある水は逃げなくてはならず, その際砂も一緒に噴き上げてしまう(噴砂現象)(第4図)。さ

らに液状化に伴って, 地盤が水平に流れることがあり(側方流動), 建造物の基礎が破壊される被害が発生する。一般に以下のような条件を備えた地盤で液状化が発生し易い。

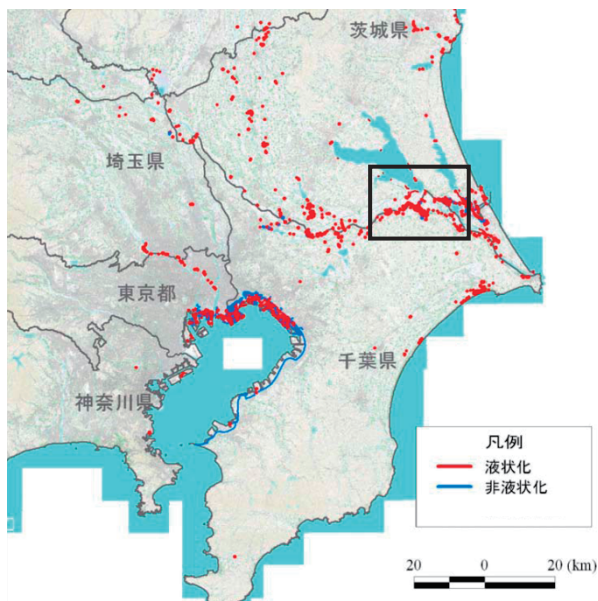
- ①絞まり具合が緩い砂地盤であること(液状化が発生する液状化層となり得る)。
 - ②地下水位が地表面に近い浅い状態であること。
- さらに加えて, 本研究課題では,
- ③地震の揺れが強くなるような地下地質構造や軟弱地盤であること。
- も重要な要素であると考えている。

液状化は1964(昭和39)年の新潟地震で大きな注目を集め, 以後, 兵庫県南部地震(1995年)や鳥取県西部地震(2000年), 芸予地震(2001年)でも被害が大きく報道された(前野, 2009)。東北地方太平洋沖地震に伴う東日本大震災では, 震源から300~400kmも離れた関東地域で, これまでに類のない広域な液状化被害が発生した(Ishihara, 2012)。

産業技術総合研究所では, 「巨大地震・津波災害に伴う複合地質リスク評価」研究プロジェクトのテーマの一つとして, 地盤液状化リスク調査・研究を2011(平成23)年から実施してきた(内田ほか, 2012)。本調査・研究テーマでは, 関東地方で被害の大きかった利根川下流域を対象にボーリングやトレンチ掘削調査等の地形・地

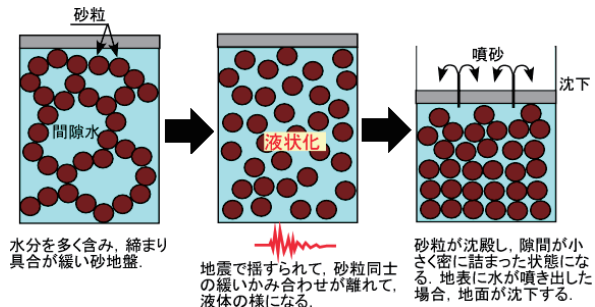
本報告は「巨大地震による複合的地質災害に関する調査・研究 中間報告」に平成25年度以降の調査・研究実施内容を追記したものである
*Corresponding author
1. 地圏資源環境研究部門 (Institute for Geo-Resources and Environment, AIST)
2. 地質情報研究部門 (Institute of Geology and Geoinformation, AIST)
3. 地質調査情報センター(Geoinformation Center, AIST) (現所属: 東京工業大学 大学院総合理工学研究所(Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology))

質学的調査,そして各種物理探査および原位置計測による液状化評価を実施し(第1表および第5図),通常の液状化調査とは異なる,より総合的な視点での液状化調査・研究を目指した.加えて,今後の液状化対策に資す



第1図 関東地方の液状化発生地点分布(国土交通省関東地方整備局・地盤工学会,2011)と本研究における利根川下流地域の現地調査範囲(矩形エリア)

Fig.1 Distribution of liquefaction occurrence points in the Kanto district and the study area (rectangle) for our field investigations in the downstream Tone River area.



第3図 液状化による沈下の原理

Fig.3 Mechanism of the settlement due to liquefaction.

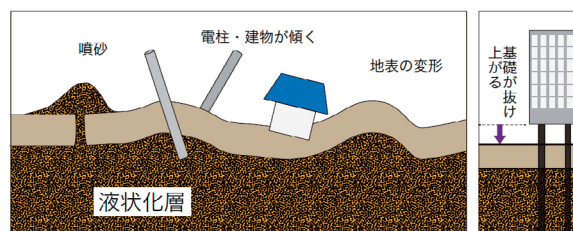
2. 地形および地質学的手法による液状化調査

利根川下流域は,江戸時代初期からの利根川東遷事業で開削され,その後も人工的な改修で,湖沼や湿地に新田開発が進められた地域である.東北地方太平洋沖地震およびその余震により,旧河道や旧水路を中心とした過去の水路を埋め立てたところで液状化被害が多く見られた.また,埋立地における液状化被害で

るため,全国的なスケールで,地震発生時に液状化の危険度マップを即座に生成するシステムの構築を実施した.本最終報告書は,これらの調査・研究成果を研究プロジェクトの最終報告書としてまとめたものである.



第2図 利根川下流地域における液状化被害の例
Fig.2 Examples of the liquefaction damage in the downstream Tone River area.



第4図 液状化被害の模式図

Fig.4 Simple diagram of liquefaction damage.

も程度の相違があり,地形や地質条件,自然地盤と人工地盤の違い,地下水位の違い起因した違いが原因と考えられ,地形・地質条件に基づく液状化の原因を探ることが重要であると思われた.

そのため本研究課題では,利根川下流域を対象に液状化地域と非液状化地域で,主にボーリング調査やトレンチ掘削調査を実施し,液状化層の同定や過去の液

状化の痕跡を確認した。また既存のボーリング調査情報を収集・整理し、広域的な液状化特性の評価を行った。

小松原（純）ほか（2014）では、利根川下流域の既存のボーリング調査情報から3次元の地質・地盤モデルを作成し、それに基づき地盤増幅度と液状化危険度（PL値）の分布を求めている。小松原（琢）ほか（2014）では、3地区で行ったトレンチ掘削調査から、人工地盤だけでなく、自然地盤も含めて液状化が発生した可能性があることや上盤厚の空間変化に伴う拘束圧の変化に起因した発生、酸化に伴う膠結作用による液状化の抑制の可能性等を考察している。風岡ほか（2014）では、香取サイトと神崎サイトの2サイトで実施したボーリング調査により、人工地盤を中心に液状化が発生しただけでなく、自然地盤の河道堆積物の一部も液状化し、それは元禄地震時にも液状化したものと考察している。さらに田辺ほか（2014）は、利根川左岸域の広域な範囲で採取した10本のボーリングコア堆積物を解析し、液状化により噴砂の見られた地点は地下水水位が0.6～1.1mと浅く、液状化した砂層を被覆する人工土壌もしくは泥層の層厚が0.6～1.2mと薄いこと

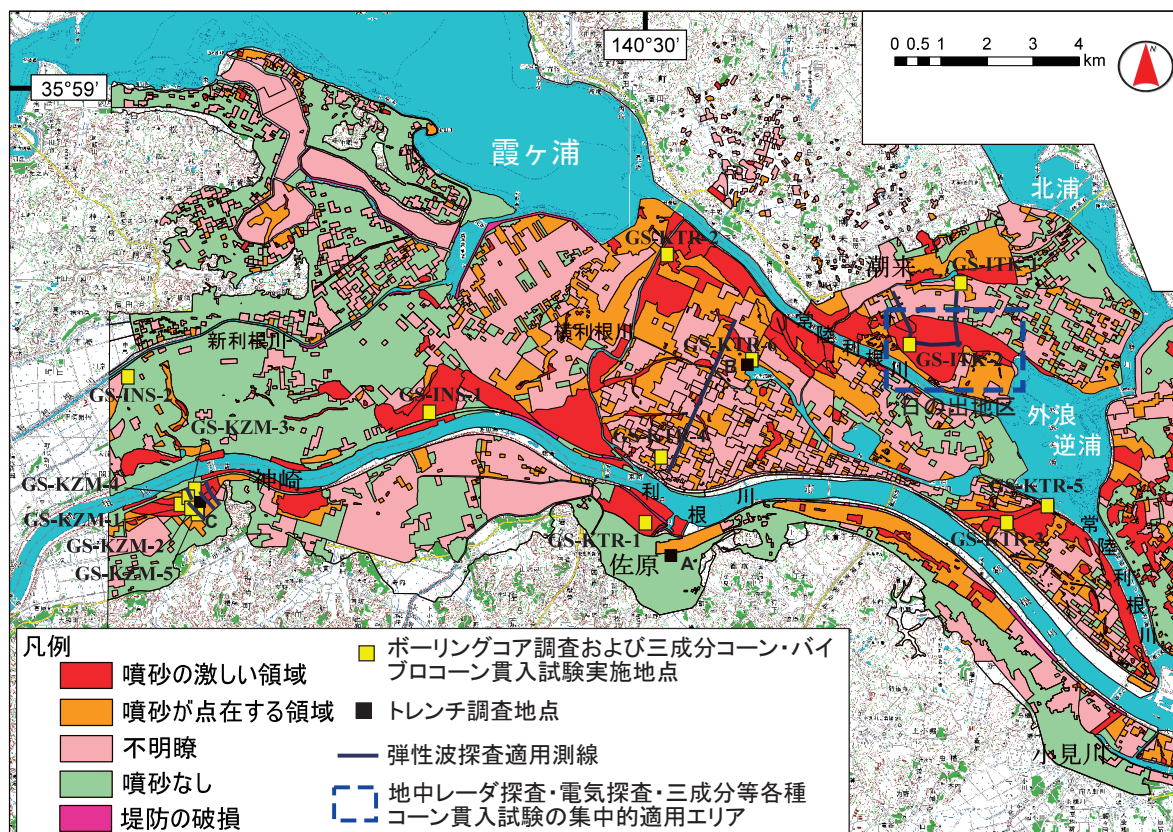
等を見出し、また、自然地盤であっても500年前までの地層ならば条件を整えば液状化し、噴砂が発生することを考察している。

3. 物理探査および原位置計測に液状化評価

従来より、液状化判定には液状化抵抗率FLを深さ毎に算出するFL法という簡易判定法が用いられる（日本道路協会，2012）。FLは地盤の液状化に対する強さと地震によって作用する力の強さの比で、土層構成、地下水位、標準貫入試験結果、細粒分含有率から求められ、この値が1.0以下のとき液状化すると見なされる（国土交通省液状化対策技術検討会議，2011）。しかし、今回のような大規模な液状化エリアでは、ボーリング調査に費用がかさみ、また地表に液状化が認められなかったかあるいは見落とされた場所でも、地中では液状化が発生している場合もあり得る（稲崎，2013）。

第1表 本研究プロジェクトにおける利根川下流域での各種現地調査の実績
Table 1 List of our various field investigations in the downstream Tone River area.

調査地域	調査項目	数量	目的	報告書関連箇所
茨城県潮来市	ボーリング調査	2地点(掘削長40m,20m各1地点)	液状化層の特定、深度別層相・年代、N値などの特性分布確認	小松原(純)ほか(2014) 田辺ほか(2014)
	三成分コーン貫入試験	144点(延べ1319.40m)	地盤構造・液状化ポテンシャル導出のため	神宮司・中島(2014)
	パイロコーン貫入試験	20点(延べ273.96m)	液状化地盤の特定のため	
	オートマッチングサウンド試験	34点(延べ356.00m)	三成分コーン貫入試験の補足(Ⅲ)3.2に含めて記載)	
	ピエゾドライブコーン貫入試験	10地点(延べ405.6m)	液状化ポテンシャル導出のため	
	電気探査	6地点	簡易液状化評価のため	横田ほか(2014) 横田(2014)
	地下水位・電気伝導度調査	6地点	簡易液状化評価のため	
	地中レーダー探査	22測線(延べ60,701m)	液状化に伴う路面下の地盤のゆるみと規模の把握	
	弾性波探査(表面波・S波反射法)	3測線(全長4,000m)	埋立土分布および沖積層基底構造の把握	
茨城県稲敷市	ボーリング調査	2地点(掘削長60m,20m各1地点)	液状化層の特定、深度別層相・年代、N値などの特性分布確認	小松原(純)ほか(2014) 田辺ほか(2014)
	三成分コーン貫入試験	2地点(延べ約40m)	地盤構造・液状化ポテンシャル導出のため	神宮司・中島(2014)
	パイロコーン貫入試験	2地点(延べ約40m)	液状化地盤の特定のため	
千葉県香取市	ボーリング調査	6地点(掘削長60m,10m各1地点、20m×4地点)	液状化層の特定、深度別層相・年代、N値などの特性分布確認	小松原(純)ほか(2014) 田辺ほか(2014) 風岡ほか(2014)
	トレンチ調査	2地点	噴砂の供給源・流動構造、液状化していない地層の特性等解明	小松原(琢)ほか(2014)
	三成分コーン貫入試験	6地点(延べ約120m)	地盤構造・液状化ポテンシャル導出のため	神宮司・中島(2014)
	パイロコーン貫入試験	8地点(延べ約160m)	液状化地盤の特定のため	
	弾性波探査(表面波・S波反射法)	1測線(全長3,500m)	旧河川跡の堆積物分布および沖積層基底構造の把握	
千葉県神崎町	ボーリング調査	5地点(掘削長60m,20m各1地点、15m×3地点)	液状化層の特定、深度別層相・年代、N値などの特性分布確認	小松原(純)ほか(2014) 風岡ほか(2014)
	トレンチ調査	1地点	噴砂の供給源・流動構造、液状化していない地層の特性等解明	小松原(琢)ほか(2014)
	三成分コーン貫入試験	5地点(延べ約100m)	地盤構造・液状化ポテンシャル導出のため	神宮司・中島(2014)
	パイロコーン貫入試験	5地点(延べ約100m)	液状化地盤の特定のため	
	弾性波探査(表面波・S波反射法)	4測線(全長2,000m)	旧河川跡の堆積物分布および沖積層基底構造の把握	
茨城県河内町	ボーリング調査	1地点(掘削長20m)	液状化層と層序の特定	田辺ほか(2014)
茨城県取手市	ボーリング調査	1地点(掘削長20m)	液状化層と層序の特定	
千葉県我孫子市	ボーリング調査	1地点(掘削長20m)	液状化層と層序の特定	
千葉県野田市	ボーリング調査	1地点(掘削長20m)	液状化層と層序の特定	



第5図 利根川下流域における噴砂等液状化分布 (小松原 (純) ほか, 2014) と各種現地調査の位置図

Fig.5 Locations of our various field investigations on the distribution map of liquefaction (sand boil) areas (Komatsubara et al., 2014) in the downstream Tone River area.

そのため本研究課題では、従来のボーリング調査と比べ迅速に計測が可能な三成分コーン貫入試験を、茨城県潮来市日の出地区を対象に集中的に適用し(第5図)、また新規の手法であるピエゾドライブコーン貫入試験を試験的に適用した。いずれも土壌のサンプリングを行うことなくFL法によって液状化の判定が行うことが可能である。さらに、ボーリング調査や貫入試験のような点の情報だけでなく、地下断面図として地盤情報を把握できる電気探査や地中レーダ探査を日の出地区で、弾性波探査を他のエリアを含めた利根川下流域で実施した。

神宮司・中島(2014)では、潮来市日の出地区において実施した三成分コーン貫入試験の結果として求めたPL値マップと、液状化層厚比による液状化判定マップを比較し、後者の方が実際の被災状況と整合していることを示している。さらに独自に開発したパイブレーションコーン貫入試験を適用し、PL値では不明瞭であった液状化判定が、より明確に差異を識別できる可能性があることを示した。横田(2014)は、潮

来市日の出地区で実施したS波反射方地震探査および表面波探査の結果を報告し、地表から深度数メートルまでの浅部に浚渫土で埋め立てられた埋立土層およびその下にシルトを多く含む柔らかい地層の分布をイメージングしている。また横田ほか(2014)は潮来市日の出地区で実施した総測線長60,701mの車載型地中レーダ探査の結果を報告し、15箇所、道路の路面下の緩み度合いが顕著であると解釈している。

4. 液状化危険度の広域推定と危険度マップ即時推定システムの構築

東日本大震災では東北地方から関東地方にかけて、これまでに類のないくらい広域で液状化被害が発生した。このような広域での液状化リスク評価では、前述のようなボーリング調査等の詳細な評価手法では効率的ではなく、概略的な情報ではあるが、より簡易な評価手法が適している。そして広域的な液状化リスク評価は、自治体や企業の地震直後のサプライチェーン

ンを考慮した応急対応で有益であると考えられる。

松岡ほか (2014) は、地形・地盤分類 250m メッシュマップ (若松・松岡, 2013) の微地形区分から液状化発生率を統計的に推定する手法を適用し、地震後に地震記録が公開されると即座に日本全国の地震動マップを推定して結果を公開するシステム: QuiQuake と連携させ、全国的な液状化危険度マップを即座に推定するシステムを構築した。さらに、今回の液状化被害で、旧河道や旧池沼での被害が多かったことを受けて、明治時代の旧版地形図の活用に着目し、旧版地形図で水域となっている箇所を、新たに地形・地盤分類 250m メッシュマップに旧河道・旧池沼として追加登録し、メッシュマップの高度化を図った。現在、構築した液状化危険度マップ即時推定システムは LiquickMap として公開している。

(<https://gbank.gsj.jp/QuiQuake/LiquickMap/>)

5. おわりに

液状化被害に関する調査・研究は、大学、研究所、自治体、土木関連企業等の様々な機関で実施されているが、産総研では、液状化の原因となる地質・地盤の構造の解明に注目し、ボーリングやトレンチ掘削調査、各種貫入試験や物理探査手法による非破壊地盤構造調査を実施した。またより広域な液状化リスク評価のための危険度マップ即時推定システムの構築を実施した。調査・評価研究結果については関連自治体に直接説明し、また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」を 2013 年 12 月に開催し、関連研究機関や地質調査企業等への説明・意見交換会を開催した (水野ほか 2013; 神宮司ほか, 2013)。調査・評価研究結果の取りまとめや公表は現在も継続中であり、随時、学会やホームページを通じて公表して行く予定である。

謝辞

利根川下流域における各種調査実施に際しては、茨城県潮来市・稲敷市、千葉県香取市・香取郡神崎町の自治体関係部署にご協力頂いた。また第 2 図、第 4 図、第 5 図の作成に関しては、産総研複合地質リスク評価地盤液状化リスクメンバー各位にご協力頂いた。ここに記して、謝意を表します。

文献

稲崎富士 (2013) 液状化被災地における物理探査お

よび地質学的総合調査: 千葉県幕張海浜公園での浅部地盤調査例. 物理探査, **66**, 45-55.

Ishihara, K. (2012) Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto regions in the 2011 Great East Japan Earthquake, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Earthquake, 63-81.

神宮司元治・光畑裕司・横田俊之・中島善人 (2013) 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—. GSJ 地質ニュース, **2**, 380-384.

神宮司元治・中島善人 (2014) 利根川下流域液状化エリアにおける各種液状化ポテンシャル調査とその評価. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 319-342.

風岡 修・水野清秀・吉田 剛・宮地良典・森崎正昭・田辺 晋・香川 淳・小松原純子・古野邦雄・小松原 琢 (2014) 利根川下流低地での液状化・流動化層準—2011 年東北地方太平洋沖地震と過去の履歴—. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 289-296.

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.

国土交通省液状化対策技術検討会議 (2011) 「液状化対策技術検討会議」検討成果. 31p.

小松原純子・水野清秀・石原与四郎・石原武志・安原正也・稲村明彦・風岡 修 (2014) 利根川下流域における液状化被害分布と地下地質との対応. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 245-272.

小松原 琢・宮地良典・水野清秀・風岡 修・齋藤 勝・細矢卓志 (2014) 液状化・流動化層のトレンチ調査. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 273-288.

前野昌弘 (2009) 災害列島日本の地盤を探る. 日刊工業新聞社, 248p.

松岡昌志・山本直孝・若松加寿江 (2014) 微地形区分に基づく液状化危険度の広域推定と危険度マップ即時推定システムの構築. 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

- る調査・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 373-382.
- 水野清秀 (2013) 液状化しやすい地質特性の解明ー利根川下流域を対象とした産総研でのとりくみの紹介ー. GSJ 地質ニュース, 2, 376-379.
- 日本道路協会 (2012) 道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編. 318p.
- 田辺 晋・宮田雄一郎・中島 礼・水野清秀 (2014) 利根川左岸地域における沖積層ボーリングコア堆積物の解析結果. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 297-318.
- 内田利弘・神宮司元治・横田俊之・水野清秀・小松原純子・松岡昌志・中島善人・上田 匠・光畑裕司 (2012) 利根川下流域を中心とする地盤液状化リスク評価研究の紹介. GSJ 地質ニュース, 6, 176-180.
- 若松加寿江・松岡昌志 (2013) 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用. 日本地震工学会誌, no.18, 33-38.
- 横田俊之 (2014) 利根川下流域液状化エリアにおける弾性波探査による地盤構造調査と液状化. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 343-358.
- 横田俊之・神宮司元治・光畑裕司 (2014) 利根川下流域液状化エリアにおける車載型 GPR による路面下調査. 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・研究報告書, 産業技術総合研究所地質調査総合センター速報, no.66, 359-372.