2011 年東北地方太平洋沖地震による潮来市日の出地区の 液状化被害と液状化層の粒度組成

ト 部 厚 志* 山 本 泰 士**+

Relation between Liquefaction Damages and Grain Size Distribution of Liquefied Sand Caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake in the Hinode Area of Itako City

Atsushi URABE* and Taishi YAMAMOTO**+

[Received 9 October, 2016; Accepted 6 March, 2017]

Abstract

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused significant liquefaction in the Kanto district. Many houses, roads, and lifelines were damaged due to liquefaction. Serious liquefaction damages occurred in the artificial filled land in the Hinode area of Itako City. We investigated house damage caused by liquefaction and conducted a borehole survey in the Hinode area. The results show that liquefaction occurred in the sand layer in man-made strata caused by a sand pump system. It was revealed that the differences in house damages in the Hinode area was relate to the thickness and grain size distribution of the dredged sand layer in the man-made strata. The examination of grainsize analysis of the stratum with the possibility of liquefaction is a higher precision technique for evaluating the risk of liquefaction.

Key words : liquefaction damage, grain size distribution, Hinode, Itako City

キーワード : 液状化被害, 粒度組成, 日の出地区, 潮来市

I. 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では、関東地方の広い範囲にわたり液状化現象が発生し、住宅、道路やライフライン等に大きな被害を与えた。これらの液状化被害の分布は、地震直後から多くの調査研究が進められ、東京湾岸の埋立地や利根川下流域において顕著であ

ることが明らかとなった（国土交通省関東地方整備局・地盤工学会, 2011; 安田・原田, 2011; 先名ほか, 2012 など）。また、東北地方太平洋沖地震による液状化現象については、土地利用・地形変遷、地震の加速度、地盤条件や微地形との関連や再液状化などさまざまな観点からの分析が進められてきている（小荒井ほか, 2011; 千葉県環境研究センター, 2011; 若松, 2012; 先名ほか, 2012;

* 新潟大学災害・復興科学研究所

** 新潟大学理学部

+ 現所属：山形県三川町役場

* NHDR, Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan

** Faculty of Science, Niigata University, Niigata, 950-2181, Japan

+ Present address: Mikawa Town Hall, Mikawa, Yamagata, 997-1301, Japan

青山ほか, 2014; 須貝・本多, 2015; 若松・先名, 2015 など)。

利根川下流域のうち、茨城県潮来市日の出地区では、顕著な液状化被害が発生した。日の出地区は、内浪逆浦と呼ばれていた潟湖を干拓し、その後、浚渫土砂を用いた盛土によって宅地となった地区である。2011 年の東北地方太平洋沖地震では、宅地造成のために浚渫土砂によって盛土された砂層が液状化し、約 3,000 軒以上の住宅が被害を受けたことが明らかとなっている（潮来市, 2014; Nirei *et al.*, 2016 など）。

日の出地区の液状化被害に関する調査について、卜部（2011, 2013）は、被災直後の現地調査による住宅被害の分布と液状化を引き起こした盛土（砂層）の層相の概要を報告した。橋本・安田（2012）は、潮来市が実施した罹災証明の調査データに基づき、町丁目ごとに被災程度の判定結果や住宅の傾斜量・沈下量をまとめ、日の出地区南部での住宅被害が甚大であることを明らかにした。神宮寺・中島（2014）は、日の出地区内の 143 地点における 3 成分コーン貫入試験のデータから、表層地盤の層相と PL 値の分布を明らかにし、非液状化層/液状化層の層厚比による液状化判定と被害分布の関係を検討した。横田（2014）は、被害地域を横断する測線において S 波反射法探査や表面波探査を行い、全体の地盤構造や表層部の S 波速度構造を明らかにした。

これまでの調査報告によって、日の出地区の液状化による住宅被害と噴砂の分布概要から宅地造成の際に盛土された砂層が液状化したことが明らかとなっている。しかし、基本的な事項として、液状化を引き起こした砂層の層相・粒度組成と液状化による住宅被害との関係などの解明は十分ではない。そこで、本稿では、日の出地区の住宅被害の分布を考慮した複数地点においてオールコアボーリングを実施し、表層地盤を構成する層相の記載や粒度分析から、液状化を引き起こした砂層の層相と住宅被害との関係を検討した。

II. 潮来市日の出地区の地盤形成

潮来市日の出地区は、茨城県南部の利根川下流

域に位置する（図 1）。潮来市周辺は、利根川左岸に位置し潟湖が点在する低平地である。日の出地区はかつて内浪逆浦と呼ばれ、隣接する外浪逆浦とつながる潟湖であった。内浪逆浦は、まず 1931～1950 年の事業により干拓され水田として利用された後、1970～1977 年の事業により盛土され 196 ha の住宅地となった（潮来町浪逆土地整理組合, 1978）。干拓時は、囲み土手を設置した上で排水により乾陸化させた。その後の宅地造成のための盛土は、外浪逆浦や常陸利根川から浚渫船により吸い上げた土砂をパイプにより運搬し、盛土予定地に放出するサンドポンプ工法によって行われた。このため、日の出地区の宅地地盤は、まず、泥質堆積物が主体の潟湖の堆積物を乾陸化することにより地下水位をいったん低下させた過程を経て、砂層が主体となる浚渫土砂を数 m 単位で盛土して造成したという 2 つの過程を経ている特徴がある。なお、浚渫により盛土した土砂は、東京湾岸の埋立地の埋立構成層と比較すると比較的淘汰のよい砂層を主体とする特徴がある。

III. 調査手法

日の出地区の液状化の被害調査は、2011 年 4 月 13～15 日に行った。住宅被害の記載はおもに木造住宅を対象として、液状化に起因した不同沈下に伴う住宅の傾きを 1/20 以上、1/20 未満～わずか（目視可能な傾き）、軽微（目視では傾きがわからない程度）の 3 段階に区分した。これらの区分は、木造住宅の傾きという基準では、内閣府の建物被害判定（1 次調査）基準の全壊、大規模半壊～半壊、一部損壊～被害なしに相当する。また、宅地内における車庫やブロック塀等の沈下や周辺道路の液状化による変状も補足データとして記録した（図 1）。

ボーリング調査は、後述する町丁目ごとの被害程度の差異から、住宅被害が比較的少ない 2, 7 丁目と被害が集中している 4, 5, 6, 8 丁目の公園地内において実施した。掘削は、エコプローブ（東亜利根ボーリング製：EP26）を用いて、口径 86 mm のサンプラーにより 1 m ごとに深度 5～

図 1 潮来市日の出地区の液状化被害とボーリング調査位置. 地形図は、国土地理院発行の 1/25000 地形図「潮来」を用いた。

Fig. 1 Liquefaction damages and borehole survey points in the Hinode area of Itako City. The topographical map used 1/25000 “Itako” of the Geographical Survey Inst.

6 m までのコア採取を行った。

採取したコア試料は半割し層相の記載等を行った。また、後述するようにコアの層相に堆積構造や葉理が残っているかなどを基準として (Lowe, 1975; 風岡ほか, 1994), 液状化している層準であるかの観察を行った。さらに、粒度分析用として 1 ~ 5 cm の間隔で試料を採取した。粒度組成の測定は、採取した試料のなかから 10 cm ごとの試料を選定し、新潟大学所有の正豊工学実験装置製作所製・沈降式粒度分析装置 (M-TS15) を用いて、島津製作所製電子天秤 UX420H で沈降中の質量変化を測定した。また、沈降管天秤法粒度分析用アプリケーション S Tube (成瀬, 2005) を用いて -1.0ϕ から 5.0ϕ までの粒度組成を 0.2ϕ 間隔で測定し、平均粒径値、分級度 (標準偏差), 歪度, 尖度, 最頻値, および中央粒径値を求めた。

なお、4, 5, 6, 8 丁目のボーリング地点の近傍 (掘削孔から 10 m 以内) に分布する地表の噴砂を比較試料として 5 試料ずつ採取した。これらの地点での噴砂は、噴砂孔や噴砂した亀裂等の特定は困難であるが、地表に層厚 10 ~ 15 cm 程度で広く分布していた。また、試料の採取に際しては、地表に分布する噴砂の断面観察を行い、単一のユニットであることを確認し、各地点において試料を採取した。これらの噴砂試料は、コア試料と同様の方法で粒度分析を行った。

IV. 日の出地区の被害状況

日の出地区では、噴砂、木造住家の不同沈下による傾き、道路の変形や側方流動など、液状化による典型的な被害が広範囲で発生した。日の出地区の建物の不同沈下による傾きを基準とした 3

段階の区分による被害の分布を示す（図1）。

液状化による住宅被害は、常陸利根川左岸沿いの自然地盤の低地（田んぼ）や宅地では発生しておらず、浚渫土砂によって盛土された砂層で造成された日の出地区の旧内浪逆浦の範囲のみで発生していた（図1）。一方、日の出地区内の被害分布を詳細にみると浚渫土砂によって造成された宅地のすべてにおいて一様に液状化が発生し、住宅に被害を与えたわけではないことがわかる。全体としてみると、日の出地区の住宅の約50%が半壊程度以上の被害を受けているが、とくに3, 4, 5, 6, 8丁目において不同沈下の程度の大きな住宅や道路の液状化による被害が集中している。これに対して、日の出地区南端部や北部の2丁目や7丁目では、外見上の液状化による住宅の不同沈下量が少なく、道路や宅地（庭）の変形もごくわずかであった。このような被害程度の差異は、日

の出地区が元々の潟湖を盛土して造成された経緯からみると、盛土に用いた砂層の層相や層厚が住宅の被害程度（不同沈下量）の差異となっている可能性がある。

V. 表層地盤の層相と堆積過程

日の出地区は、浚渫土砂によって盛土された砂層で造成されているが、同じ工程をへた宅地地盤のなかでの液状化の発生程度に差異がある（図1）。また、液状化した地区において、液状化した地下の地層の層相を明らかにすることは、復旧方法や防止策の策定につながる重要な課題である。このため、液状化による住宅被害が顕著な4, 5, 6, 8丁目の公園内と、住宅被害が比較的少ない2丁目と7丁目の公園内で、深度5～6mまでの表層地盤のボーリング調査をおこない、層相の観察、液状化の有無等の記載を行った（図

図2 各ボーリングコアの層相と液状化層準。

Fig. 2 Facies and liquefaction horizon of each core.

2)。また、図3には、後述する2丁目コアと7丁目コアでの層相の観察を例として、液状化している層準（層相）と非液状化の層準（層相）の様相を示した。本論での液状化の判定基準は、流動化して砂層の層理や葉理構造を失っている層相を液状化しているものとし、若干、液状化の影響を受けているが砂層の層理や葉理が残っている層相を非液状化として区分した。なお、浚渫土砂によって盛土された砂層と下位の潟湖の環境での堆積物（とくに砂層）は、砂層の色調や貝化石片の有無で比較的容易に区分できる。

1) 2丁目コアの層相と堆積過程

2丁目は、液状化による住宅被害が比較的小さい地点である。コアは日の出2丁目の日の出第3児童公園内で採取した（掘削位置：北緯35度56分12.1秒，東経140度34分39.4秒，坑口標高：

2.115 m，掘削時の坑内水位の標高（以下：水位標高）：1.245 m）。

コア試料の深度498～336 cmは、暗灰色のやや泥質な細～極細粒砂層からなり、一部に生物擾乱が認められる。深度336～332 cmは、砂質シルト層からなる。深度332～274 cmは暗灰色のやや泥質な細～中粒砂層からなり、一部に生物擾乱が認められる。深度274～156 cmは暗緑灰色の細～中粒砂層の薄層を挟在中～粗粒砂層からなる。深度156～35 cmは暗緑灰色の細～中粒砂層で貝化石片を多く含む。深度35～15 cmは明褐色の泥質な中粒砂層，深度15～0 cmは泥質な細粒砂層からなる（図2）。

深度498～274 cmの暗灰色の細粒砂層を主体とする層準は、一部に生物擾乱がみられることから、日の出地区が潟湖であったときの層相を示していると考えられる。この上位の深度274～35 cmの暗緑灰色の中粒砂層は、下位の砂層と色調や硬さが異なることや後述する粒度組成の特徴から、浚渫土砂によって盛土された砂層であると推定できる。深度35 cmより上位の層準は、盛土を宅地造成した際の攪乱部分と表土（山砂による盛土）である。本コアでは深度274 cmが自然地層と人工地層の境界である。

堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は、深度266～248 cm（図3b），深度223～190 cm，深度130～92 cmである。

2) 4丁目コアの層相と堆積過程

4丁目は液状化による住宅被害が多い地点である。コアは日の出4丁目の日の出第2近隣公園（ひょうたん池公園）内で採取した（掘削位置：北緯35度55分54.5秒，東経140度34分19.3秒，坑口標高：1.688 m，水位標高：0.088 m）。

コア試料の深度600～430 cmは、暗灰色の粘土～シルト層からなり、極細粒砂層の薄層を挟在する。また、一部に生物擾乱が認められる。深度430～405 cmは、暗灰色の砂質シルト層からなり、下位の粘土～シルト層よりやや締まっている。深度405～218 cmは暗緑灰色の中～細粒砂層からなり、全体に単層の境界は不明瞭である。深度218～215 cmは暗灰色のシルト層で流動変形し

図3 コアでの液状化と非液状化の層相例。aは7丁目コアの深度145～110 cm。bは2丁目コアの深度265～230 cm。

Fig. 3 Example of facies of liquefied/non-liquefied layer in the core. a: no. 2 core (depth: 145-100 cm). b: no. 2 core (depth: 265-230 cm).

ている。深度 215 ～ 44 cm は暗緑灰色の細～中粒砂層からなり、全体に単層の境界は不明瞭である。深度 44 ～ 15 cm は明褐色の泥質な細～中粒砂層、深度 15 ～ 0 cm は砂質シルト層からなる(図 2)。

深度 600 ～ 405 cm の暗灰色のシルトを主体とする層準は、一部に生物擾乱がみられることから、日の出地区が潟湖であったときの泥質な堆積物であると考えられる。このうち深度 430 ～ 405 cm の層準は、下位のシルト層より締まっており、やや土壌化していることから、干拓後の旧耕作土の層相を示す可能性がある。この上位の深度 405 ～ 44 cm の暗緑灰色の細～中粒砂層は、浚渫土砂によって盛土された砂層であると推定できる。深度 44 cm より上位の層準は、宅地造成した際の攪乱部分と表土である。本コアでは深度 405 cm が自然地層と人工地層の境界である。堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は、深度 405 ～ 252 cm と深度 236 ～ 151 cm である。

3) 5 丁目コアの層相と堆積過程

5 丁目は液状化による住宅被害が多い地点である。コアは日の出 5 丁目の日の出第 4 児童公園内で採取した(掘削位置：北緯 35 度 55 分 42.5 秒、東経 140 度 34 分 21.6 秒、坑口標高：1.792 m、水位標高：0.892 m)。

コア試料の深度 500 ～ 400 cm は、暗灰色のやや有機質な砂質シルト層からなり、細粒砂層の薄層や極細粒砂層をレンズ状に挟在する。また、シルト層には生物擾乱が認められる。深度 400 ～ 98 cm は暗緑灰色の細～中粒砂層からなり、全体に塊状である。深度 98 ～ 49 cm は暗緑灰色の細～中粒砂層からなり、貝化石片を多く含む。深度 49 ～ 10 cm は明褐色の泥質な中粒砂層、深度 10 ～ 0 cm は礫混じりの砂質シルト層からなる(図 2)。

深度 500 ～ 400 cm の暗灰色の砂質シルトを主体とする層準は、一部に生物擾乱がみられることや細～極細粒砂の薄層を挟在することから、潟湖であったときの堆積物であると考えられる。この上位の深度 400 ～ 49 cm の暗緑灰色の細～中粒砂を主体とする砂層は、浚渫土砂によって盛土さ

れた砂層であると推定できる。深度 49 cm より上位の層準は、盛土を宅地造成した際の攪乱部分と表土である。本コアでは深度 400 cm が自然地層と人工地層の境界である。堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は、深度 382 ～ 158 cm と深度 142 ～ 100 cm でありほぼ浚渫土砂によって盛土された砂層の全体に及んでいる。

4) 6 丁目コアの層相と堆積過程

6 丁目は液状化による住宅被害が多い地点である。コアは日の出 6 丁目の日の出第 1 近隣公園内で採取した(掘削位置：北緯 35 度 55 分 48.1 秒、東経 140 度 34 分 5.8 秒、坑口標高：1.334 m、水位標高：0.644 m)。

コア試料の深度 600 ～ 479 cm は、暗灰色の粘土～シルト層からなり、生物擾乱が認められる。深度 479 ～ 378 cm は暗灰色のやや泥質な細粒砂層からなり、生物擾乱が発達する。深度 378 ～ 360 cm は、暗灰色のシルト層からなり生物擾乱が発達する。また、深度 360 ～ 340 cm は暗灰色のやや泥質な細～中粒砂層からなり生物擾乱が発達する。この上位の深度 340 ～ 300 cm は、暗灰色のシルト～砂質シルト層からなり生物擾乱が発達する。深度 300 ～ 179 cm は暗緑灰色の細～中粒砂層からなり、深度 179 ～ 78 cm は暗緑灰色の中～粗粒砂層からなる。深度 78 ～ 23 cm は明褐色の泥質な中粒砂層や細～中粒砂層、深度 23 ～ 0 cm は泥質な中粒砂層からなる(図 2)。

深度 600 ～ 300 cm の暗灰色のシルトや泥質な細～中粒砂層を主体とする層準は、生物擾乱がみられることから、旧潟湖の堆積物であると考えられる。この上位の深度 300 ～ 78 cm の暗緑灰色の中粒砂層を主体とする層準は、浚渫土砂によって盛土された砂層であると推定できる。深度 78 cm より上位の層準は、盛土を宅地造成した際の攪乱部分と表土である。本コアでは深度 300 cm が自然地層と人工地層の境界である。堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は、深度 278 ～ 100 cm であり、ほぼ浚渫土砂によって盛土された砂層の全体に及んでいる。

5) 8 丁目コアの層相と堆積過程

8 丁目は液状化による住宅被害が多い地点である。コアは日の出 8 丁目の日の出第 6 児童公園内で採取した（掘削位置：北緯 35 度 55 分 58.8 秒，東経 140 度 33 分 49.1 秒，坑口標高：1.15 m，水位標高：0.15 m）。

コア試料の深度 600 ～ 493 cm は，暗灰色のシルト層からなり極細粒砂層の薄層を挟在する。深度 493 ～ 436 cm は暗緑灰色の中～細粒砂層からなり，シルト層の薄層を挟在する。深度 436 ～ 313 cm は暗緑灰色の細～中粒砂層からなる。深度 313 ～ 85 cm は暗緑灰色の中～粗粒砂層からなり貝化石片を含む。深度 85 ～ 16 cm は明褐色の泥質の中～細粒砂層，深度 16 ～ 0 cm は泥質の中粒砂層からなる（図 2）。

深度 600 ～ 493 cm の暗灰色のシルト層を主体とする層準は，旧潟湖の堆積物であると考えられる。この上位の深度 493 ～ 85 cm の暗緑灰色の中粒砂層を主体とする層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層であると推定できる。深度 85 cm より上位の層準は，盛土を宅地造成した際の攪乱部分と表土である。本コアでは深度 493 cm が自然地層と人工地層の境界である。堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は，深度 482 ～ 400 cm，深度 370 ～ 330 cm と深度 273 ～ 100 cm でありほぼ浚渫土砂によって盛土された砂層全体の層準に及んでいる。

6) 7 丁目コアの層相と堆積過程

7 丁目は液状化による住宅被害が比較的少ない地点である。コアは日の出 7 丁目の日の出第 5 児童公園内で採取した（掘削位置：北緯 35 度 56 分 14.8 秒，東経 140 度 34 分 6.0 秒，坑口標高：2.012 m，水位標高：1.183 m）。

コア試料の深度 500 ～ 447 cm は，暗灰色の中～粗粒砂層からなり生物擾乱が発達する。深度 447 ～ 400 cm は，暗灰色の細粒砂層からなり生物擾乱が認められる。深度 400 ～ 374 cm は，暗灰色の中粒砂層からなり，深度 374 ～ 362 cm は，暗灰色のシルト層からなる。深度 362 ～ 175 cm は，暗灰色のやや泥質な細～中粒砂層からなる。深度 175 ～ 15 cm は暗緑灰色の粗～中粒砂

層と中～粗粒砂層の細かい互層からなる。深度 15 ～ 7 cm は明褐色の泥質な細～中粒砂層，深度 7 ～ 0 cm は泥質な細粒砂層からなる（図 2）。

深度 500 ～ 175 cm の暗灰色の細～中粒砂層を主体とする層準は，旧潟湖の堆積物である。この上位の深度 175 ～ 15 cm の暗緑灰色の中～粗粒砂層を主体とする層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層であると推定できる。深度 15 cm より上位の層準は，盛土を宅地造成した際の攪乱部分と表土である。本コアでは深度 175 cm が自然地層と人工地層の境界である。

堆積構造等の乱れから明らかに液状化したと判断できる層準は，深度 133 ～ 100 cm のみである（図 3a）。

6 地点のコア観察の結果をまとめると，液状化による住宅被害が顕著な 4，5，6，8 丁目の表層地盤は，深度 3 ～ 4 m 程度まで浚渫土砂によって盛土された中粒砂層で構成され，2 丁目と 7 丁目では深度 2 m 程度まで浚渫土砂によって盛土された粗～中粒砂層で構成されていることが明らかとなった。また，浚渫土砂によって盛土された砂層の下位は，4，5，6，8 丁目では旧潟湖に堆積したシルト層であり，2 丁目と 7 丁目では旧潟湖に堆積した砂層から構成されている。

コア試料の層相から，液状化の顕著な層位を記録すると 4，5，6，8 丁目のコア試料では浚渫土砂によって盛土された砂層のほぼ全体が液状化しているのに対して，2 丁目と 7 丁目のコア試料では浚渫土砂によって盛土された砂層の全体ではなく一部の層位のみが液状化していることが明らかとなった。また，各地点ともに，浚渫土砂によって盛土された砂層より下位の潟湖に堆積した砂層は液状化していないことが明らかとなった。

VI. 粒度分析結果

液状化による住宅被害は，浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚や粒度組成と関連している可能性がある。このため，各地点コアについて 10 cm ごとに粒度分析を行った。各コアについて代表的な層位における 0.2 ϕ ごとの粒度分布（頻度分布）を図 4 に，垂直方向の平均粒径，分級度，

図 4 各ボーリングコアの粒度組成 (粒径頻度分布)。柱状図の凡例は図 2 と同じ。図中の粒度分析のグラフの縦軸は %, 横軸は f を示す。
 Fig. 4 Grain size distribution of each core. Legends of the columnar section are the same as Fig. 2. Vertical axis of the particle size analysis shows % scale and horizontal axis shows f scale.

歪度，尖度，最頻値，中央粒径値の変化を図5～7に示した。

1) 2丁目コアの粒度組成

深度274～35 cmの層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度70，120，170，220 cmと270 cmから採取した試料の粒度分布（頻度分布）を図4に示す。これらの試料の粒度分布は， $1.5 \sim 2.3 \phi$ 付近に粒度のピークを示している。また， $2.5 \sim 3.0 \phi$ 付近にも小さいピークをもつ二峰性の粒度分布を示す特徴がある。下位の深度274 cm以深は，旧潟湖に堆積した堆積物であり，このうち深度320 cmと370 cmの試料は， $2.5 \sim 3 \phi$ 程度に一つのピークをもつ粒度分布を示している。

平均粒径は，浚渫土砂によって盛土された砂層で $1.7 \sim 2.5 \phi$ を示し，旧潟湖の堆積物では $2.5 \sim 3.5 \phi$ を示す。また，全体として垂直方向での数値のばらつきがある（図5a）。分級度は全体的に変化が少なく，ほぼ $0.4 \sim 0.8$ を示す。浚渫土砂によって盛土された砂層と旧潟湖に堆積した砂層の間に分級度の大きな差はなかった。最頻値と中央粒径は，平均粒径と同様な傾向を示し，浚渫土砂によって盛土された砂層で 2ϕ 程度を示し，旧潟湖の砂層では $2 \sim 3 \phi$ を示す（図5a）。コアの観察から液状化を示す層準では，平均粒径，分級度，最頻値や中央粒径が同様の数値を示す傾向がみられる（図5a）。

2) 4丁目コアの粒度組成

深度405～44 cmの層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度80，130，210，270 cmと340 cmから採取した試料の粒度分布を図4に示す。これらの粒度分布は，深度270 cmを除き，2あるいは 2.5ϕ 付近に粒度のピークを示している。深度270 cmは，二峰性のピークを有する。下位の深度405 cm以深は，旧潟湖に堆積した堆積物であり，このうち深度410 cmと480 cmの試料は， $3 \sim 4 \phi$ 程度にピークをもつ粒度分布を示している。

平均粒径は，垂直方向で類似した数値を示している部分が多く，浚渫土砂によって盛土された砂層では 2.5ϕ 程度を示す（図5b）。旧潟湖に堆積

した堆積物では， $3 \sim 4 \phi$ 程度を示し，ばらつきが大きい。分級度は，浚渫土砂によって盛土された砂層の部分での変化が少なく，ほぼ $0.4 \sim 0.6$ を示している。最頻値と中央粒径は，平均粒径と同様な傾向を示し，浚渫土砂によって盛土された砂層で 2.5ϕ 程度を示し，旧潟湖の堆積物では $3 \sim 4 \phi$ を示す（図5b）。コアの観察から液状化を示す層準では，平均粒径，分級度，最頻値や中央粒径が同様の数値を示す（図5b）。

3) 5丁目コアの粒度組成

深度400～49 cmの層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度55，120，170，220，320 cmと370 cmから採取した試料の粒度分布を図4に示す。これらは，全体に $2.5 \sim 3 \phi$ 程度に粒度のピークを示している。下位の深度400 cm以深は，旧潟湖に堆積した堆積物であり，このうち深度420 cmの試料は， $4 \sim 5 \phi$ 程度にピークをもつ粒度分布を示している。

平均粒径は，垂直方向で類似した数値を示している部分が多く，浚渫土砂によって盛土された砂層では 2.5ϕ 程度を示す（図6a）。旧潟湖に堆積した堆積物では， $3 \sim 3.5 \phi$ 程度を示す。分級度は，浚渫土砂によって盛土された砂層の部分での変化が少なく，ほぼ $0.4 \sim 0.6$ を示している。最頻値と中央粒径は，平均粒径と同様な傾向を示し，浚渫土砂によって盛土された砂層で 2.5ϕ 程度を示す（図6a）。コアの観察から液状化を示す層準では，平均粒径，分級度，最頻値や中央粒径の垂直方向での変化が少なくほぼ同様の数値を示す（図6a）。

4) 6丁目コアの粒度組成

深度300～78 cmの層準は，浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度85，140，170，220 cmと270 cmから採取した試料の粒度分布を図4に示す。これらは， 2ϕ と $2.5 \sim 3 \phi$ 程度に2つのピークを有する二峰性の粒度分布を示している。下位の深度300 cm以深は，旧潟湖に堆積した堆積物である。このうち深度320 cmと370 cmの試料は， $3 \sim 5 \phi$ 程度にピークをもつ粒度分布を示している。深度430 cmの砂層の粒度分布は， 3ϕ 程度のピークを有する（図4）。

図 5 2 丁目コア (a) と 4 丁目コア (b) の粒度分析. 柱状図の凡例は図 2 と同じ.

Fig. 5 Grain size analysis of no. 2 (a) and no. 4 (b) cores. Legends of the columnar section are the same as Fig. 2.

平均粒径は、浚渫土砂によって盛土された砂層の部分では 2ϕ 程度であり、垂直方向で類似した数値を示す (図 6b)。旧潟湖に堆積した堆積物では、砂層とシルト層での差異に対応して、 $2.5 \sim 4\phi$ 程度を示す。また、浚渫土砂によって盛土さ

れた砂層と旧潟湖に堆積した砂層の平均粒径は大きく異なる。分級度は、浚渫土砂によって盛土された砂層の部分での変化が少なく、ほぼ $0.6 \sim 0.8$ を示している。最頻値と中央粒径は、平均粒径と同様な傾向を示し、浚渫土砂によって盛土

図 6 5 丁目コア (a) と 6 丁目コア (b) の粒度分析. 柱状図の凡例は図 2 と同じ.

Fig. 6 Grain size analysis of no. 5 (a) and no. 6 (b) cores. Legends of the columnar section are the same as Fig. 2.

された砂層で 1.5ϕ 程度を示す (図 6b)。コアの観察から液状化を示す層準では、平均粒径、分級度、最頻値や中央粒径の垂直方向での変化が少なくほぼ同様の数値を示す (図 6b)。

5) 8 丁目コアの粒度組成

深度 493 ~ 85 cm の層準は、浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度 90, 160, 240, 320, 410 cm と 480 cm から採取した試料の粒度分布を図 4 に示す。これらは、全体に 2.5

図 7 8 丁目コア (a) と 7 丁目コア (b) の粒度分析. 柱状図の凡例は図 2 と同じ.

Fig. 7 Grain size analysis of no. 8 (a) and no. 7 (b) cores. Legends of the columnar section are the same as Fig. 2.

～2φ程度にピークをもつ粒度分布を示している。一部の層準では二峰性の粒度分布を示す。下位の深度493 cm以深は、旧潟湖に堆積した堆積物である。このうち深度530 cmの試料は、3～5φ程度にピークをもつ粒度分布を示している (図

4)。

平均粒径は、浚渫土砂によって盛土された砂層の部分では2～3φ程度であり、下位ほど細粒となる傾向がある (図7a)。旧潟湖に堆積した堆積物では、2.5～4φ程度を示す。分級度は、浚渫

土砂によって盛土された砂層の部分での変化が少なく、ほぼ0.4～0.6を示している。最頻値と中央粒径は、平均粒径と同様な傾向を示し、浚渫土砂によって盛土された砂層で2～3φ程度を示す(図7a)。コアの観察から液状化を示す層準では、平均粒径、最頻値や中央粒径は下位に向かって細粒化する傾向がみられるが、分級度は垂直方向での変化が少なくほぼ同様の数値を示す(図7a)。

6) 7丁目コアの粒度組成

深度175～15 cmの層準は、浚渫土砂によって盛土された砂層である。このうち深度20, 70 cmと120 cmから採取した試料の粒度分布を図4に示す。これらは、2φ前後と2.5～3φ程度に2つのピークをもつ二峰性の粒度分布を示している。下位の深度175 cm以深は、旧潟湖に堆積した堆積物である。このうち深度180, 220, 280, 320 cmと430 cmの試料は、2.5～3φ程度にピークをもつ粒度分布を示している(図4)。

平均粒径は、浚渫土砂によって盛土された砂層の部分では1.5～2.5φ程度であり、ばらつきが大きい(図7b)。旧潟湖に堆積した堆積物では、2～2.5φ程度を示す。分級度は、ほぼ0.6程度を示している。最頻値と中央粒径は、平均粒径と同様な傾向を示し、浚渫土砂によって盛土された砂層で1.5～2.5φ程度、旧潟湖に堆積した堆積物では2～2.5φ程度を示す(図7b)。7丁目コアでは液状化を示す層準が限定的であり、平均粒径、分級度、最頻値や中央粒径の傾向は不明である(図7b)。

7) 噴砂試料の粒度組成

液状化による被害が多かった4, 5, 6, 8丁目のボーリング掘削地点付近の地表で採取した噴砂試料の粒度組成を図8に示す。4丁目の噴砂試料は、おおむね2.5～3φ程度にピークを有するが二峰性を示す試料もあり、全体には淘汰が悪い。5丁目の噴砂試料は、2.5～3φ程度にピークを有し、他地点の試料と比較すると淘汰がよい傾向がある。1試料のみが二峰性の粒度分布を示すが、ほぼ同様な粒度組成を有する砂が液状化によって噴出したことを示している。6丁目の噴砂試料は1.5～3φのさまざまなピークを有して

図8 噴砂試料の粒度組成(粒径頻度分布)。

Fig. 8 Grain size distribution of sand boiling samples.

おり、ばらつきが大きい。8丁目の噴砂試料は、1.5～3φ程度のなだらかなピークを示すが、ほぼ同様な粒度組成を有する砂が液状化によって噴出したことを示している。

VII. 考 察

日の出地区の液状化による住宅被害は、旧潟湖を造成した同じ地区のなかでも液状化による住宅の不同沈下量や被害の集中度に差異が認められた。まず、浚渫による盛土砂層の粒度特性、地表の噴砂試料と地下の液状化層の粒度組成を述べ、次に液状化による住宅の被害程度(液状化による不同沈下の程度)の差異の要因について、以下に考察する。

1) 浚渫による盛土砂層の粒度特性

図4に示すように、浚渫土砂によって盛土された砂層の粒度組成は二峰性を示すことが多い。一般に二峰性を示す粒度分布は、異なる堆積プロセスによる砂粒子の混合を推定することができる(田村・増田, 2004 など)。船による浚渫では異なる堆積プロセスをもつ堆積物を一括して採取しているため、浚渫土砂によって盛土された砂層は、二峰性をもち粒度組成を示す可能性がある。このため、二峰性を示す砂層は、浚渫土砂によって盛土された砂層という特有の過程を特徴づけるものと考えられる。

2) 地表の噴砂試料と地下の液状化層の粒度組成

沼田ほか(1999)や沼田・森(2002)は、各地の実際の地震時に噴出した噴砂試料や地下の液状化層までのトレンチ調査での事例から、噴砂と液状化層の粒度組成が類似する場合が多いことを示した。このため地下の液状化層の粒度組成を推定する方法として、地表の噴砂試料を利用できる可能性が高いことを指摘している。

本論において、日の出地区の地中の液状化した砂層の粒度組成(図4)と比較すると、5丁目コアと噴砂の粒度組成は類似しているが、他地点では液状化した砂層と噴砂の粒度組成は類似していない。日の出地区の場合、噴砂試料の粒度組成は地点ごとの多様性が高く、必ずしも地下の液状化層の粒度組成と一致しないことが明らかとなった。地表の噴砂試料から、地下の液状化層の粒度組成を推定することは簡易で効率的であるが、多くの地点でボーリングする機会を得て、検証していく必要がある。

3) 浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚と被害程度の関係

日の出地区の液状化被害は、日の出地区を農地から宅地に造成する過程において、宅地盛土の材料として用いたサンドポンプ工法による浚渫土砂により盛土した砂層(人工地層)が液状化したことに起因している(潮来市, 2014 など)。砂層の液状化の可能性について、橋本・安田(2012)は、浚渫土砂によって盛土された砂層と下位の旧

潟湖に堆積した砂層の双方が、「建築基礎設計指針」(日本建築学会, 2001)の解析手法に基づく液状化する可能性を指摘している。また、一般に液状化は、液状化層(H1)に対して非液状化層(H2)の層厚が薄い場合は、地表での液状化の影響が大きくなることが知られている(石原, 1996)。この関係からみると、被害の多かった日の出地区の中央部から南部においては、非液状化層(H2)に相当する地下水位より上位の地層の層厚に対して、液状化層(H1)に相当する地下水位より下位の浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が厚かったことが被害の集中した要因と考えられている(橋本・安田, 2012; 神宮司・中島, 2014 など)。

本研究では、液状化による被害程度の異なる6地点において、ボーリング調査によりコア試料を採取し、各地点の層相の記載を行った(図1, 2)。この結果、全体的には、被害の大きかった地点(4, 5, 8丁目)では浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が4~5m程度で、被害の少なかった2丁目や7丁目では浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が1.5~3m程度であった。地下水位より下位の浚渫土砂によって盛土された砂層の全体を液状化層(H1)としてとらえれば、地区全体の被害の概要としては液状化層(H1)と非液状化層(H2)の関係から被害程度の差異の説明ができる可能性もある。しかし、コアの詳細な観察結果によると浚渫土砂によって盛土された砂層のすべてが液状化したわけではない(図2)ことに加え、層厚のみの観点では浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が同程度である2丁目と6丁目の被害程度の差異が説明できない。

なお、浚渫土砂によって盛土された砂層の下位は、旧潟湖に堆積した砂層である場合とシルト層である場合がある。この下位層の層相の相違が浚渫土砂によって盛土された砂層の液状化の程度に与えた影響の評価については今後の課題である。

4) 浚渫土砂によって盛土された砂層の粒度組成と被害程度の関係

浚渫土砂によって盛土された砂層の層相と粒度

組成の変化に着目して、液状化による住宅の被害程度・被害の集中との関係を検討した。図9は、各コア試料の粒度分析結果から、平均粒径のみを抽出して、浚渫土砂によって盛土された砂層とコア観察での液状化層準との関係を整理したものである。浚渫土砂によって盛土された砂層の粒度は、7丁目や2丁目コアの一部で1.5～2.0 ϕ 程度のやや粗粒な部分もあるが、全体的には2～3 ϕ 程度である。コア観察による液状化層準との関係をみると特定の平均粒径を有する砂層が選択的に液状化したわけではない(図9)。一方で、コアで液状化を示す層準(区間)の平均粒径は、垂直方向での変化が小さい傾向がある。とくに、浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が同程度である2丁目と6丁目の粒度組成変化を比較すると、6丁目コアでは2 ϕ 程度の平均粒径を示す層準がすべて液状化しているのに対して、2丁目コアでは2.5 ϕ 程度と2 ϕ 程度の平均粒径を示す層準が互層状に認められ、このうち2 ϕ 程度の層準のみが液状化している(図9)。すなわち、浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚が同程度である2丁

目と6丁目を比較すると、2丁目では液状化した層準が部分的であり浚渫土砂によって盛土された砂層全体が液状化しなかったことが明らかとなった。

液状化現象の伝播について、鈴木・鈴木(1988)は、液状化の危険性がある地層のなかで、液状化はもっともしやすい箇所から発生する性質があり、その部分を起点として地震動が続いている間、徐々に周囲へ液状化が伝播していくモデルを示している。このモデルでは、最初に液状化が発生した部分とその周囲の地層の粒度特性が類似している場合、液状化が伝播しやすく短時間の内に広い範囲にまで液状化が拡大していく。これに対して、液状化の起点となった部分と上下層準の粒度特性が大きく異なる場合、液状化は伝播しにくいため、起点の周辺の僅かな範囲しか液状化しないうちに地震動が終了し、液状化の規模は小さく収まるとされている。

このモデルに基づき、日の出地区における各地点の平均粒径の変化をみると、被害が大きかった4地点は、垂直方向での粒度組成が類似していた

図9 各ボーリングコアの平均粒径と液状化層準。

Fig. 9 Average grain size (Mean) and liquefaction horizon of each core.

ため、液状化が短時間で上下層準に伝播し浚渫土砂によって盛土された砂層全体が液状化したものと考えられる。一方、被害が小さかった2丁目と7丁目では、深度ごとに平均粒径の変化が大きく、粒度組成が上下層準で類似している部分が少なかったため、液状化が浚渫土砂によって盛土された砂層全体に伝播せず部分的な液状化にとどまったものと考えられる。

ここで、液状化した層準での粒度組成が類似していることは、初生的なものであるか、液状化したことによって粒度組成が類似したのかという2つの可能性がある。日の出地区のコア観察では、液状化が認められる層準全体が流動化して混合しているわけではない。また、コア試料と噴砂試料の粒度組成を比較すると異なることが多く(図4, 8), 必ずしも地中で液状化して粒度組成が揃ったのちに噴砂として地表に砂が到達しているわけではない。これらから、コア試料の液状化した層準での粒度組成が類似していることは、初生的な砂層の粒度組成を反映している可能性が高いものと思われる。

このように、日の出地区において液状化被害の程度に差異が生じた要因は、概略的には浚渫土砂によって盛土された砂層の層厚に起因している。しかし、単に層厚だけでなく盛土された砂層の上下層準での粒度組成が類似しているか否かが液状化層準の拡大した要因と考えられる。よって、盛土された砂層の粒度組成が類似し、かつ、層厚が厚い地区では住宅被害が大きくなり、粒度組成のばらつきが大きかった地区では液状化による被害(住宅の不同沈下量)が少なくなったものと考えられる。

一般に、現状の液状化予測では、貫入試験時のペネ試料について層構造をよく観察せず、また、層相にまたがった試料を粒度分析する場合は少なからずある。オールコアボーリングで、地層を観察すると1mの厚さの砂層でも、複数の層から構成されている場合が多く、層ごとに試料を採取し、粒度分析することによって、今回のような結果を得ることができる。

また、建築基礎設計指針により砂層の液状化を

評価し、液状化層と非液状化層の層厚の関係から、地盤の液状化リスクを求めることに異論はない。一方、同様な層厚で液状化層と判定した砂層が分布する際に、より高い精度で液状化リスクを比較検討する場合は、本研究での手法のようにオールコアで試料を採取し、粒度組成の変化を求め、垂直方向での類似性を検討することが非常に有効であると考えられる。

VIII. ま と め

2011年の東北地方太平洋沖地震では、茨城県潮来市日の出地区において、液状化が発生し約3,000棟の住宅に被害が発生した。日の出地区は、旧潟湖を干拓した農地から宅地への造成工事の際に、浚渫土砂によって盛土された砂層で宅地地盤を盛土しており、この砂層を主体とする盛土部分が大規模かつ広範囲に液状化した。

6地点でのボーリング調査の結果、地区内での液状化による住宅被害程度の差異は、浚渫により盛土した砂層の層厚と粒度組成の相違によるもので、層厚が厚く上下層準で粒度組成が類似した部分が多い地点での被害が大きいたことが明らかとなった。

このようなオールコアで液状化の可能性を有する地層を採取し、連続的に粒度組成を検討することは、より精度の高い液状化のリスク評価につながる手法であると考えられる。

謝 辞

本研究の一部には、日本地質学会による東日本大震災・復旧復興にかかわる調査・研究事業費(代表: 卜部厚志)を使用した。また、コア試料の掘削に際し、澤田ボーリングの澤田健一氏と阿達清吉氏にはお世話になった。記して謝意を申し上げます。

文 献

青山雅史・小山拓志・宇根 寛 (2014): 2011年東北地方太平洋沖地震による利根川下流低地の液状化被害発生地点の地形条件と土地履歴. 地理学評論, **87**, 128-142. [Aoyama, M., Koyama, T. and Une, H. (2014): Geomorphological condition and land history of liquefaction damaged sites in the lower part of the Tone river lowland induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Geographical*

- Review of Japan*, **87**, 128-142. (in Japanese with English abstract)]
- 千葉県環境研究センター (2011): 千葉県内の液状化-流動化現象と詳細分布調査結果 (第4報), 浦安地区でみられた液状化-流動化現象の詳細分布・地震のゆれ方と液状化-流動化現象との関係・千葉市美浜区での人工地層および沖積層の概略的な3次元分布と液状化-流動化現象の分布の概要. 千葉県環境研究センター調査研究報告, **G-8**, 4-1-4-69. [Research Institute of Environmental Geology, Chiba (2011): Detailed distribution of liquefaction-fluidization in the Chiba Prefecture (no.4). *Research Report of the Research Institute of Environmental Geology, Chiba*, **G-8**, 4-1-4-69. (in Japanese)]
- 橋本隆雄・安田 進 (2012): 2011年東北地方太平洋沖地震による潮来市日の出地区の液状化被害分析. 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), **68**(4), I1266-I1277. [Hashimoto, T. and Yasuda, S. (2012): Study on the soil liquefaction at Hinode area in Itako city caused by the 2011 Tohoku-Pacific Ocean Earthquake. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, **68**(4), I1266-I1277. (in Japanese with English abstract)]
- 石原研而 (1996): 根入れ基礎に及ぼす地震時における深部液状化の影響. 土と基礎, **44**(4), 6-9. [Ishihara, K. (1996): Effect of at-depth liquefaction on embedded foundations during earthquakes. *Soils and Foundations*, **44**(4), 6-9. (in Japanese)]
- 潮来町浪逆土地区画整理組合 (1978): 新天地の創成. 40p. [Nasaka Land Readjustment Association of the Itako Town (1978): *Creation of New Land (Shin Tenchi No Sosei)*. 40p. (in Japanese)*]
- 潮来市 (2014): 日の出地区液状化対策事業報告書. 195p. [Itako City (2014): *Hinode District Liquefaction Measures Business Report (Hinode Chiku Ekijoka Taisaku Jigyo Hokokusho)*. 195p. (in Japanese)*] <http://www.city.itako.lg.jp/index.php?code=2163> [Cited 2016/9/1].
- 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, **66**, 319-342. [Jinguuji, M. and Nakashima, Y. (2014): The liquefaction positional investigations and those estimations along lower reaches of Tone River. in *Reports of Research and Investigation on Multiple Geological Hazards Caused by Huge Earthquakes, GSJ Interim Report* edited by Research Planning Office for Geological Survey and Applied Geoscience, **66**, 319-342. (in Japanese with English abstract)]
- 風岡 修・楠田 隆・香村一夫・楡井 久・佐藤賢司・原 雄・古野邦雄・香川 淳・森崎正昭 (1994): 液状化-流動化のメカニズムとその実態. 日本地質学会第101年総会講演要旨, 125-126. [Kazaoka, O., Kusuda, T., Koumura, K., Nirei, H., Sato, K., Hara, Y., Furuno, K., Kagawa, J. and Morisaki, M. (1994): Mechanism and situation of liquefaction-fluidization. *Abstract of the Geological Society of Japan (101st Year Meeting)*, 125-126.]
- 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情報の利活用. 国土地理院時報, **122**, 127-141. [Koarai, M., Nakano, T., Otoi, K., Une, H., Kawamoto, R. and Daigo, K. (2011): Liquefaction damages of the East Japan Great Earthquake and evaluation of liquefaction risk using geospatial information. *Journal of the Geospatial Information Authority of Japan*, **122**, 127-141. (in Japanese with English abstract)]
- 国土交通省関東地方整備局・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). 69p. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and the Japanese Geotechnical Society (2011): *Report on the Liquefaction Phenomena in the Kanto Region during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Tohoku Chiho Taiheiyō Oki Jishin Ni Yoru Kanto Chiho No Jiban Ekijoka Gensho No Jittai Kaikemi (Hokokusho))*. 69p. (in Japanese)*] <http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html> [Cited 2016/9/1].
- Lowe, D.R. (1975): Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, **22**, 157-204.
- 成瀬 元 (2005): 沈降管天秤法粒度分析用アプリケーション S Tube の特色と利用法. 堆積学研究, **62**, 55-61. [Naruse, H. (2005): Usage and advantages of an application program "STube" for settling tube grain-size analysis. *Journal of the Sedimentological Society of Japan*, **62**, 55-61. (in Japanese with English abstract)]
- 日本建築学会 (2001): 建築基礎構造設計指針. 486p. [Architectural Institute of Japan (2001): *Recommendations for Design of Building Foundations*. 486p. (in Japanese)]
- Nirei, H., Kazaoka, O., Uzawa, M., Hiyama, T., Satkunas, J. and Mitamura, M. (2016): Observation on seismically induced liquefaction-fluidization in reclaimed land at Hinode, Hoshu, Japan. *Episodes*, **39**, 568-581.
- 沼田淳紀・森 伸一郎 (2002): 噴砂の粒度組成. 土木学会論文集, **722**, 129-147. [Numata, A. and Mori, S. (2002): Grain size distribution of erupted sands due to liquefaction. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **722**, 129-147. (in Japanese with English abstract)]
- 沼田淳紀・森 伸一郎・陶野郁雄・遠藤邦彦 (1999): 液状化で生じた砂脈と噴砂に関する一考察. 土木学会論文集, **638**, 311-324. [Numata, A., Mori, S., Tono, I. and Endo, K. (1999): A study on sand dikes and sand boils caused by liquefaction. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, **638**, 311-324. (in Japanese with English abstract)]

- 先名重樹・長谷川信介・前田宣浩・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**(5), 143-162. [Senna, S., Hasegawa, N., Maeda, T. and Fujiwara, H. (2012): Liquefaction damage of the Tonegawa basin caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Journal of Japan Association of Earthquake Engineering*, **12**(5), 143-162. (in Japanese with English abstract)]
- 須貝俊彦・本多啓太 (2015): 東日本大震災および既往地震による液状化と沖積層分布. 地学雑誌, **124**, 273-286. [Sugai, T. and Honda, K. (2015): Distribution of alluvium, historic liquefaction sites, and liquefaction following the 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **124**, 273-286. (in Japanese with English abstract)]
- 鈴木輝之・鈴木利文 (1988): 飽和砂の再液状化強度に及ぼす密度と構造の変化の影響. 土質工学会論文報告集, **28**(2), 187-195. [Suzuki, T. and Suzuki, T. (1988): Effects of density and fabric change on liquefaction resistance of saturated sand. *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **28**(2), 187-195. (in Japanese)]
- 田村 亨・増田富士雄 (2004): 多数の年代値を入れた波浪卓越型堆積シーケンスの研究—千葉県九十九里浜平野と宮城県仙台北平野の完新統から得られた最近の成果—. 地学雑誌, **113**, 1-17. [Tamura, T. and Masuda, F. (2004): Recent studies on wave-dominated depositional sequences using the high-resolution ^{14}C dating analysis: The Holocene in the Kujukuri and Sendai coastal plains, eastern Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **113**, 1-17. (in Japanese with English abstract)]
- 卜部厚志 (2011): 関東地方内陸部の盛土造成宅地における液状化被害—潮来 (茨城)・日の出, 久喜 (埼玉)・南栗橋を例に—. 社会地質学会シンポジウム, 利根川中下流域の液状化・流動化・地波現象, 22-25. [Urabe, A. (2011): Liquefaction damage at the residential land in the inland areas of Kanto district. *Symposium, the Geological Hazards in Man-made Strata Occurring in the 2011 Earthquake off the Pacific Coast of Tohoku (Shakai Chishitsu Gakkai Shinpojiumu Tonegawa Chu Karyuiki No Ekijoka Ryudoka Jinami Gensho)*, 22-25. (in Japanese)*]
- 卜部厚志 (2013): 関東平野内陸部の住宅地での盛土材質の相違による液状化要因の解明. 日本地質学会・東日本大震災・復旧復興にかかわる調査・研究事業報告, **5**. [Urabe, A. (2013): Liquefaction factor by the difference of embankment materials in the residential area of the Kanto plains. *Research Report of the East Japan Great Earthquake Disasters, Geological Society of Japan (Nihon Chishitsu Gakkai Higashi Nihon Daishinsai Fukko Ni Kakawaru Chosa Kenkyu Jigyo Hokoku)*, **5**. (in Japanese)*] <http://www.geosociety.jp/hazard/content0079.html> [Cited 2016/9/1].
- 若松加寿江 (2012): 2011 年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化. 日本地震工学会論文集, **12**(5), 69-88. [Wakamatsu, K. (2012): Recurrent liquefaction induced by the 2011 Great East Japan Earthquake. *Journal of Japan Association of Earthquake Engineering*, **12**(5), 69-88. (in Japanese with English abstract)]
- 若松加寿江・先名重樹 (2015): 2011 年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生と土地条件. 日本地震工学会論文集, **15**(2), 25-44. [Wakamatsu, K. and Senna, S. (2015): Liquefaction and their site conditions in Kanto Region during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Journal of Japan Association of Earthquake Engineering*, **15**(2), 25-44. (in Japanese with English abstract)]
- 安田 進・原田健二 (2011): 東京湾岸における液状化被害. 地盤工学会誌, **59**, 38-41. [Yasuda, S. and Harada, K. (2011): Liquefaction-induced damage in the reclaimed lands along Tokyo Bay. *Geotechnical Engineering Magazine, JGS*, **59**, 38-41. (in Japanese)]
- 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, **66**, 343-358. [Yokota, T. (2014): Seismic subsurface structure surveys of the liquefaction occurred areas in the downstream region of Tone River. in *Reports of Research and Investigation on Multiple Geological Hazards Caused by Huge Earthquakes, GSJ Interim Report* edited by Research Planning Office for Geological Survey and Applied Geoscience, **66**, 343-358. (in Japanese with English abstract)]

* Title etc. translated by A.U.