

第3報 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 －浦安地区(1)－

2011年5月30日作成
千葉県環境研究センター

ここでは、浦安地区における液状化－流動化による詳細な被害状況の一部について報告するとともに、東京湾岸埋立地を中心にこれまで得られた平成23(2011)年東北地方太平洋沖地震(以下「太平洋沖地震」と略す)により生じた液状化－流動化現象とその被害分布とこれまで得られている地震動データとの関係、1987年千葉県東方沖地震(以下「東方沖地震」と略す)での液状化－流動化現象の位置と今回の同被害との関係を示し、東京湾岸埋立地における液状化－流動化被害の予防・軽減に向けて今後の復旧・復興において地質環境の視点から考慮すべき点を現時点で整理したので報告する。

浦安地区の液状化－流動化被害の詳細調査結果

東京湾岸埋立地では、液状化－流動化現象による被害の程度が場所により異なる。これらを定量的にみる指標として、杭基礎を持つと思われる構造物の抜上がり量を測定した。また、地表での被害の現れ方が異なっていることも現地踏査で認識した。このうち、今回は浦安地区における抜上がり量の分布調査結果と、被害の現れ方の違いの状況を報告する。なお、被害の現れ方の違いは現在詳細図として作成中である。作成が終了した時点で第4報として報告する予定である。

1. 液状化－流動化に伴う地盤の沈下(地層収縮)

千葉県浦安市周辺は江戸川河口部の三角州を中心とする低地帯であったが、1960年代以降サンドポンプ工法による埋め立てが進み、第1期・第2期の造成を経て現在ではその3/4を埋立地が占めている。地質的には、第四紀完新世～後期更新世末期に堆積した砂層・泥層から構成される沖積層の上に、主に東京湾の海底の第四紀層から採取された厚さ5m程度の砂・泥による人工地層が重なっている。沖積層は、約2万年前の氷河期に100m程度海面が低下した時に形成された谷を、その後の間氷期に海面が上昇した際に埋積して形成されており、浦安地区全域が層厚20m以上と厚い。このため、深い谷を埋めている沖積層の部分が「沖積の谷」と呼ばれる。ここでは、深度50mを超える「沖積の谷」が複数認められている。以上のような地質環境特性に加え、戦後の工業化に伴う地下水の過剰揚水の結果、この地域では沖積層の厚い泥層部分を中心とする地層収縮により、地盤の沈下が顕著に認められてきた地域である。なお、千葉市美浜区でみられるような液状化－流動化被害の集中帯は、浦安地区については全域が沖積層が厚い谷の中に位置する可能性があり、浦安の埋立て地区全域が集中帯の中にあることになるのかの検討は今後行う。

A. 水準点変動

千葉県では、東京湾岸部の埋立地における浅層部分の地層収縮量を監視するために、深度10m程度の基礎杭上に設置した特殊水準点(足長水準点)と地表に設置した通常的水準点をセットにした観測点を設け、毎年、一級水準測量を実施している。浦安地区では入船三丁目の旧護岸外側において、1973年から足長水準点U-12Bと水準点U-13を設置し、深度0～約10mの沖積層の一部と埋立層をあわせて地層収縮量を監視している。これによると、1973年1月から2011年1月の期間にU-12Bが-253mm、U-13が-835mmの変動量を示した。この差から、本地点における地表から深度約10mの地層収縮量は23年間で582mmに達していることがわかっている。

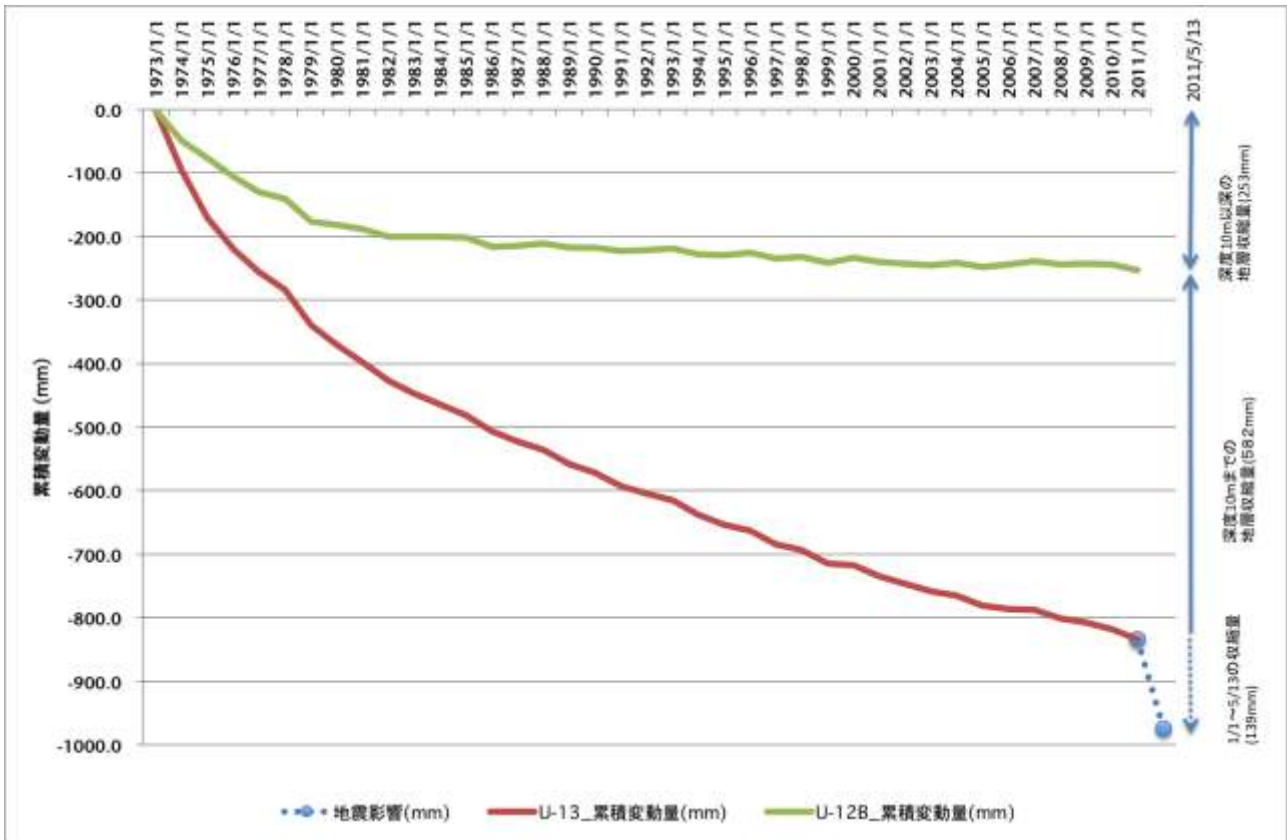


図1 水準点 U-13 と U-12b（足長水準点）の変動状況（速報値）

今回の地震で著しい液状化-流動化現象が観測されたことから、当センターが5月13日に入船三丁目の2水準点の比高を測量したところ、地層収縮量が721mmに増加していた。つまり地震をはさんだ1月1日～5月13日間に深度約10mの浅層部が139mm地層収縮したことになる。周辺では大量の噴砂を伴う液状化-流動化現象が認められていることから、約14cmに達する液状化-流動化による地盤の沈下が発生したものと推定される（図1）。

今後、埋立地全域の地盤の沈下状況を把握するため、精密水準測量を実施する必要がある。また、このデータはこの液状化-流動化現象により大きく地盤の沈下が進んでいるこの地区での復旧・復興の際の各種工事には欠かせないデータでもある。

B. 観測井による地下水位変動と地層収縮量

地下水位と地層収縮量の監視を目的とした地盤沈下観測井が、浦安市猫実に設置されている。ここでは1965年より「浦安-1（井戸深度60m、スクリーン深度33.7～45.7m）」・「浦安-2（井戸深度150m、スクリーン深度113.3～129.9m）」・「浦安-3（井戸深度220m、スクリーン深度178.5～195.1m）」の3観測井による観測が継続されている。このうち「浦安-1」では沖積層の地下水位と地層収縮量を観測している。3月11日の地震発生時には、一時的に地下水位が10cmほど上昇した後、30分ほどかけて元の水位に戻ったが、さらに低下を続け3時間後には元の水位より12cmまで低下した。この程度の地下水位の上昇では、地表面を越えるものではなく、沖積層分布域での液状化-流動化現象がみられていないことと調和的である。一方、地層収縮量は、地震発生時に急速に1mm程度収縮した後、ゆるやかな収縮が続き、およそ2ヶ月後には3mmに達している。今後、地震動と沖積層の地層収縮との関係について検討する必要がある。

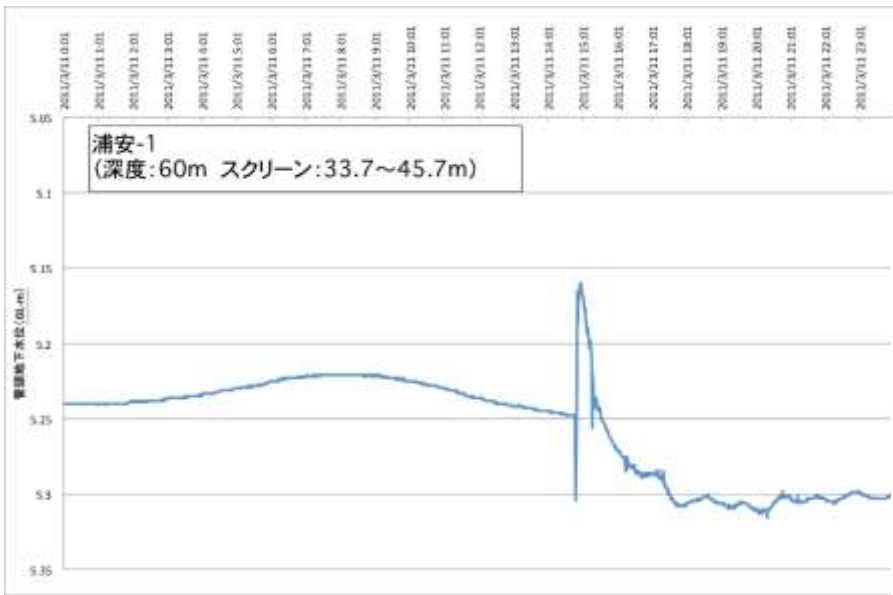


図2 浦安-1 観測井における3月11日の地下水位変動（速報値）

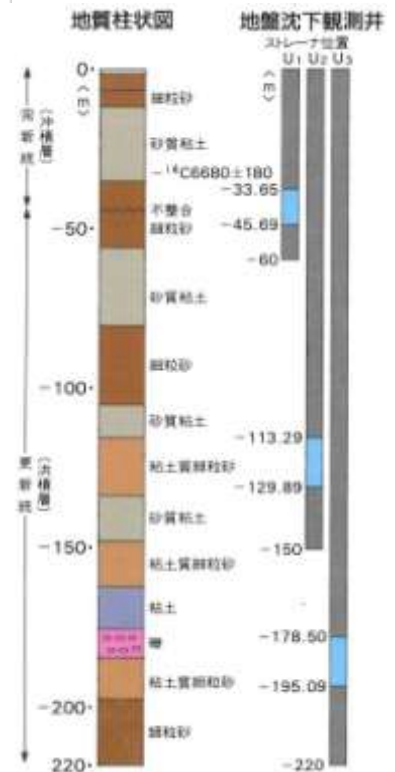


図4 浦安-1 観測井の地質柱状と観測井構造．観測井の水色部分がスクリーン設置位置

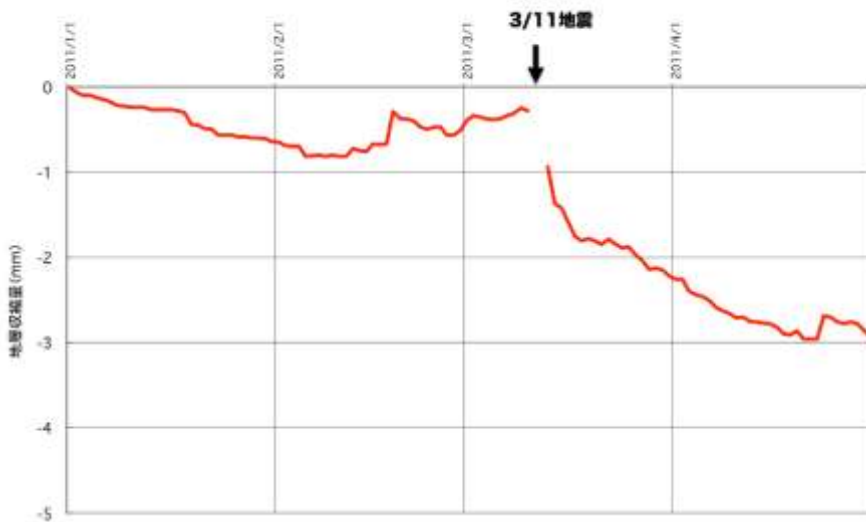


図3 浦安-1 観測井における地層収縮量の変化（1～4月速報値）

C. 構造物の「抜け上がり」量実測調査

液状化—流動化現象によって生じた地層収縮と噴砂の流失により地盤沈下が発生し、基礎を有する構造物には相対的な「抜け上がり」現象が認められた。これにより建物の損傷は軽微でもライフラインが破損し被害は甚大となった。液状化—流動化が発生した深度と基礎杭の種類や深度によって「抜け上がり」量は異なるが、液状化—流動化による地盤の沈下量の目安になると考えられることから3/22～4/15を中心に実測調査を実施した。これは基礎を有すると推定される構造物に残る、地震前の地表面の痕跡（表土・植生・セメント痕・亀裂の上盤等）と現地表との差を測定するもので、地震以前に生じた地盤沈下と明確に区別するよう留意した。本調査の結果、液状化—流動化現象の著しい地域では「抜け上がり」量も大きく、調和的な成果が得られた（図-5）。一方、首都高速道路より内陸側では「抜け上がり」量・液状化—流動化被害ともに軽微であり、さらに自然地層（沖積層）からなる旧市街では、一部を除き液状化—流動化現象は認められなかった。このため、埋立地において一様に地層収縮が生じたわけではなく、地域差が大きいことが定量的に認められた。

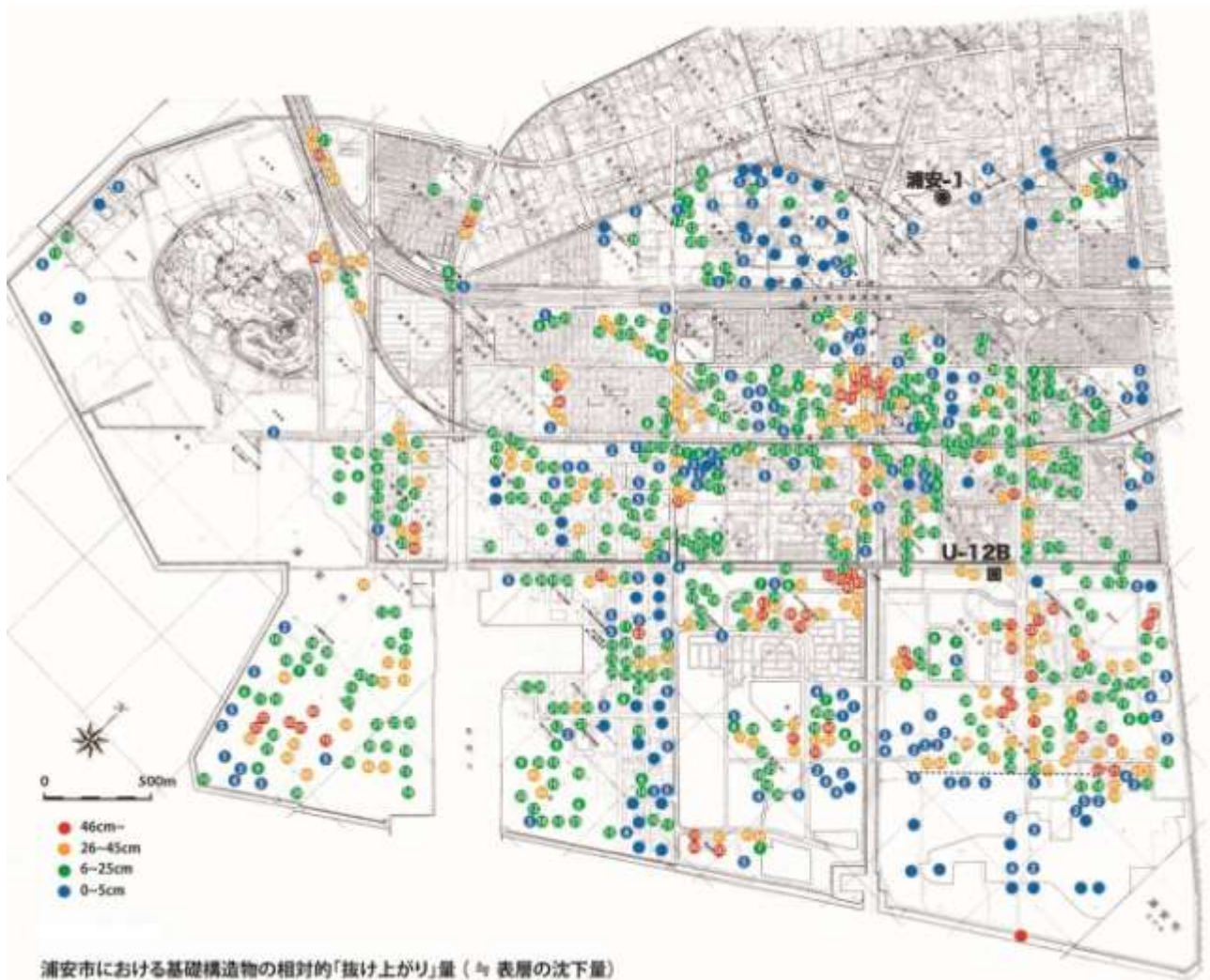


図5 浦安市における杭基礎構造を持つと推定される構造物の抜け上がり量の分布

液状化—流動化による地盤沈下が特に顕著だったのは、新浦安駅から明海にかけてのシンボルロード沿い、高洲の北端と中央・南端部、今川の旧護岸および境川沿い、富岡の境川沿いと西端部、弁天の中央部、舞浜周辺、千鳥の中南部等であった。一方、埋立地にもかかわらず海楽、東野、美浜、富岡の中央部、日の出・明海東部、港南部等では液状化—流動化による被害は比較的軽微だった。

今後、地盤改良工法や建築構造の効果等を確認しつつ、顕著な液状化—流動化現象の原因について地質ボーリング調査や物理探査、地震観測等によって地質との関連を明らかにしていく必要がある。

2. 液状化—流動化現象の地表での被害の現れ方の違い

液状化—流動化現象に伴う被害については、噴砂、道路の変形、レンガ塀や電柱の傾き・沈み込み、戸建て住宅のような浅層基礎を持つ構造物の傾きなどを中心に地表から観察し踏査した結果、被害の現れ方の違いについて以下のように識別した。なお、埋立地の中には地表から観察する分には先に述べた液状化—流動化現象に伴う被害がみられないところも存在するが、被害の現れ方を3タイプに区分した。この区分に従い、現在この詳細分布を踏査している。なお、これら詳細な被害状況の分布に関しては、千葉市美浜区の概要調査でみられるように、100m オーダーで変化している。踏査終了に合わせて、分布図を第4報として今後報告していく。

Aタイプ：多量の噴砂がみられる。道路は大きく波打ち鉛直方向に 30cm 以上の凹凸や段差がみられる。道路わきの U 字溝は波打っていたり破損したりしている。戸建て住宅などの低層の構造物は傾いたり沈み込んだりしている。電柱や塀は大きく傾いたり数十 cm 以上沈み込んだりしている。



今川 道路が40cm程度沈下, 電柱は沈み傾いた。



舞浜 道路中央が相対的に高くなり, 両脇が数十 cm 沈下している。両脇の戸建て住宅とレンガ塀は数十 cm 程度沈み込んでいます。電柱は沈降し傾いている。



今川 車庫が 30cm 程度沈降した。大量の噴水により床面から 90cm の高さまで水没した。この水位は道路面上約 60cm の水深となったことになる。



舞浜 戸建て住宅が 30~50cm 沈み込んだ。



入船 3階建てのビルが 50cm 程度沈降した。周囲の道路もいっしょに沈降し, 電柱は大きく傾いた。



日の出 歩道の波うち, 凹凸の高さは40cm程度。



日の出 道路中央が高くなり，両脇が数十 cm 沈下し，その両脇はさらに沈下し，排水ボックスが横向きになった。



鉄鋼団地 大量の噴砂とコンクリート塀が沈み込み大きく傾いた。



日の出 日の出おひさま公園のU字溝が波うっている。ここでは地震直後はこれら溝が噴砂で埋まっていた。



鉄鋼団地 倉庫が大きく傾いている



鉄鋼団地 電柱が数 m 沈み込んだ。



鉄鋼団地 入口のコンクリート階段が沈み込んだ。

Bタイプ：噴砂がみられる。道路は波うち鉛直方向に10～20cm程度の凹凸や段差がみられる。道路わきのU字溝の一部は破損している。戸建て住宅などの低層の構造物は少し傾いたり沈み込んだりしている。電柱や塀は傾いたり10～20cm程度沈み込んだりしている。



今川 ブロック塀は10～20cm 提訴沈降している。



今川 道路わきの戸建て住宅敷地部分は10～20cm程度沈下した。道路わきの排水路は波うっている。



今川 構造物の抜け上がりは20cm程度



今川 道路と歩道が波打つ。凹凸の落差は20cm程度である。



舞浜 左の塀の端で20cm程度沈降した。



舞浜 道路の右カーブの内側が 20cm 程度沈下した。



入船 道路面に波うちがみられる。また、戸建て住宅は 20cm 程度沈み込んでいる。



舞浜 宅地部分が 20cm 程度沈下した。レンガ塀も 20cm 程度沈み込んでいる。



日の出 日の出おひさま公園では入口付近は噴砂が多く、地表面の変形もみられる。入口の門から南へ進むにつれ、噴砂は少なくなり地表面の変形はわずかとなる（Cタイプ）。さらに南では、被害はみられない。



今川 今川記念公園の周囲を囲む盛土の周辺では、その重さにより道路面とともに 20cm 程度沈んでいる。

Cタイプ：噴砂がみられる。道路は数 cm 程度のわずかな波打ちや亀裂がみられる。電柱には沈降や傾きはみられない。ごくまれにレンガ塀などが少し傾いていることがある。



日の出 日の出おひさま公園内。噴砂はみられるものの、この歩道部分はほとんど変形がみられない。



舞浜 噴砂の跡がみられるが、道路面は亀裂がみられる程度で、変形はほとんどみられない。



高洲 噴砂の跡はみられるが、道路面に変形はほとんどみられない。電柱やレンガ塀に沈み込みや傾きはみられない。

Dタイプ：噴砂はみられない。道路は亀裂や凹凸などはみられない。電柱・塀は沈み込みや傾きはみられない。家は沈み込みや傾きなどはみられない。

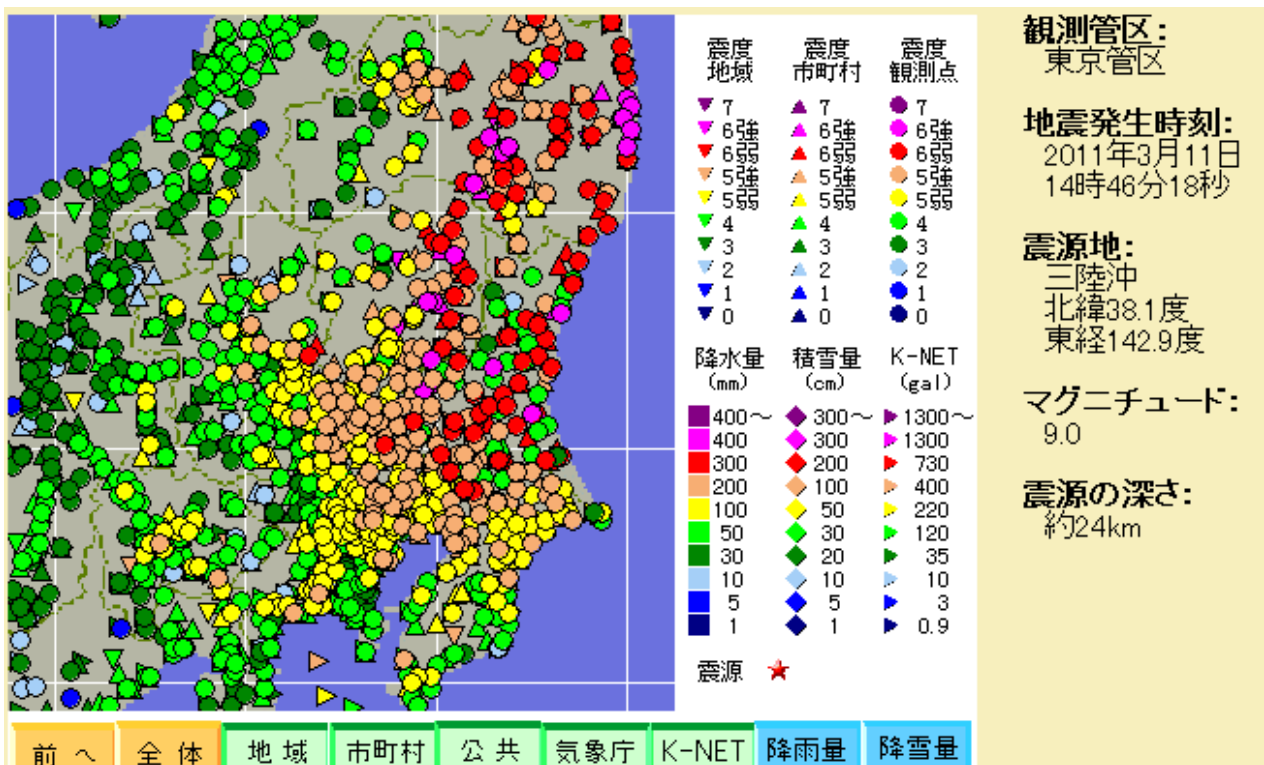


図 7 気象庁震度階の分布（地震予知総合研究振興会，2011 <http://www.adepr.or.jp/shindo/Screen/C123380.html>）

2. 液状化－流動化現象と強震観測データとの関係

2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震では、細粒砂を主体としたサンドポンプ工法による埋立地において液状化－流動化現象が起り、周辺の地震観測点の波形データをもとにラディエーション変換した後のゆれの最大速度を求めると、20～24cm/sec以上のゆれである（図3；風岡ほか，2001）。なお、ラディエーション変換とは、地震観測点でえられた地震波形を、地震の到来方向の向きからみた揺れ方に変換することをいう。地震は震源から四方へ伝わっていくので、異なる観測点での揺れ方を比べる際には、到来方向からみた揺れ方に変換して比較する必要がある。なお、この際到来方向の揺れをラディアル成分、これに直行する方向の揺れをトランスバース成分と呼ぶ。一般に震源に近い部分ではラディアル成分が強く、遠くなるとトランスバース成分が強い傾向にある。このラディエーション変換は、手作業で行う必要があるため、手間がかかりあまり行われない。しかし、異なる地点での揺れ方の客観的な比較を行う際には必要な作業である。

今回の地震において、本センター地質環境研究室管理の観測点および防災科学技術研究所が設置する強震観測網 K-net の観測点でこれまで得られた地震波形データをもとに、液状化－流動化被害と揺れ方との関係について解析した。主に液状化－流動化現象が起きたのは人工地層分布域であることから、人工地層上及びその隣接地に設置している本センター観測点の袖ヶ浦、防災科学技術研究所観測点の CHB008 浦安・CHB009 千葉・CHB024 稲毛である。なお、地震動の解析にあたっては独立法人建築研究所国際地震工学センターの鹿嶋俊英博士が開発した View Wave を利用した。

地震観測点「袖ヶ浦」は、袖ヶ浦市長浦の埋立地に設置してある。この設置場所および周辺の臨海コンビナートが立地する埋立地では噴砂はほとんどみられていない。計測震度は4.6（5弱）であり、最大速度はトランスバース成分が16.4cm/secである（図9の「袖ヶ浦」）。

地震観測点「CHB008 浦安」は、浦安市猫実1丁目に設置してある。この場所は旧海岸線に隣接した沖積層上の低地である。液状化－流動化現象は、この場所ではみられないが、隣接する埋立地側ではみられる。計測震度は5.2（5強）と大きい。最大速度も28.8cm/secと大きい（図9の「CHB008 浦安」）。

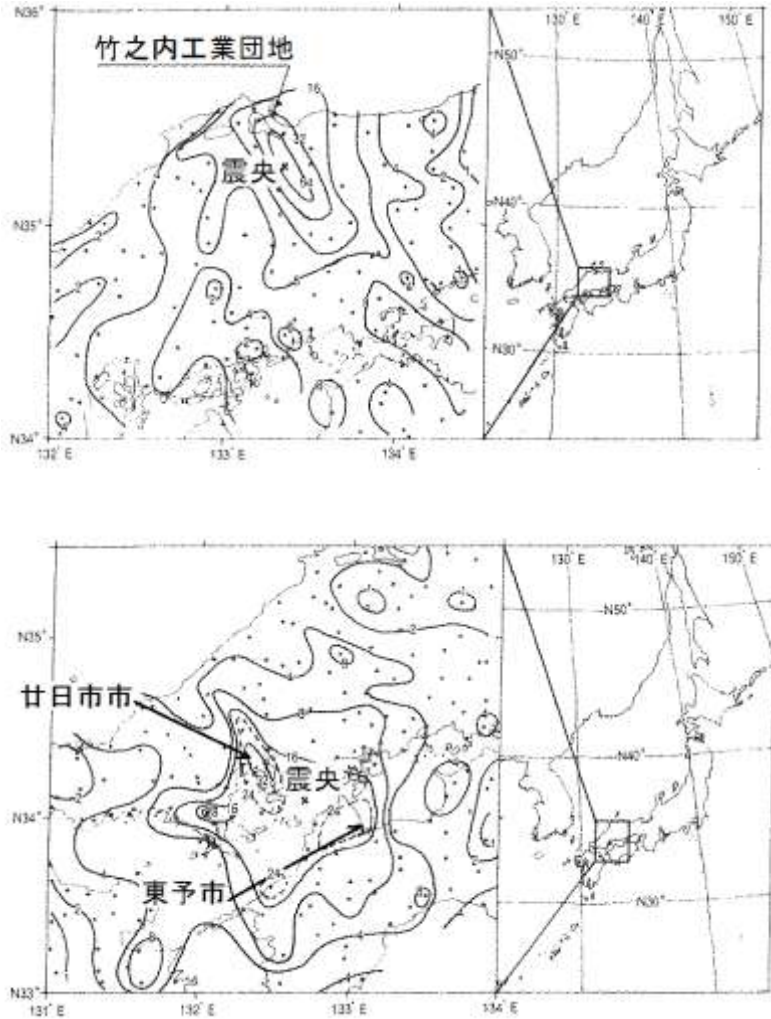


図 8 2000 年鳥取県西部地震時(上)と 2001 年芸予地震時(下)の揺れの最大速度分布(風岡ほか, 2001)。
 2000 年鳥取県西部地震時には竹之内工業団地の埋立地において大規模な液状化—流動化現象が発生した。2001 年芸予地震時には矢印の山口県甘日市の埋立地と愛媛県東予市の埋立地において液状化—流動化現象が発生した。

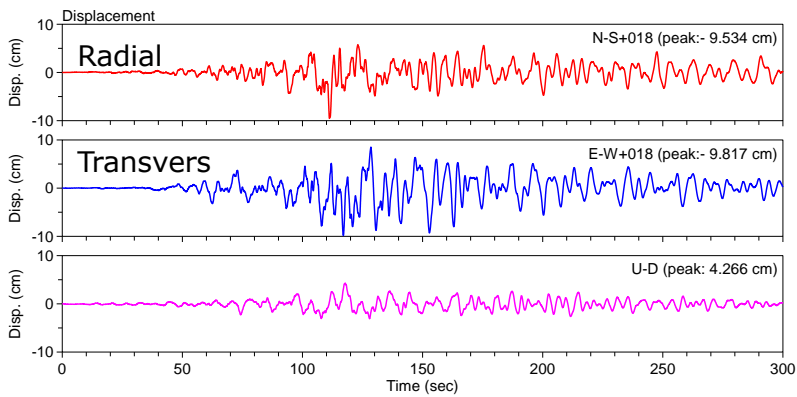
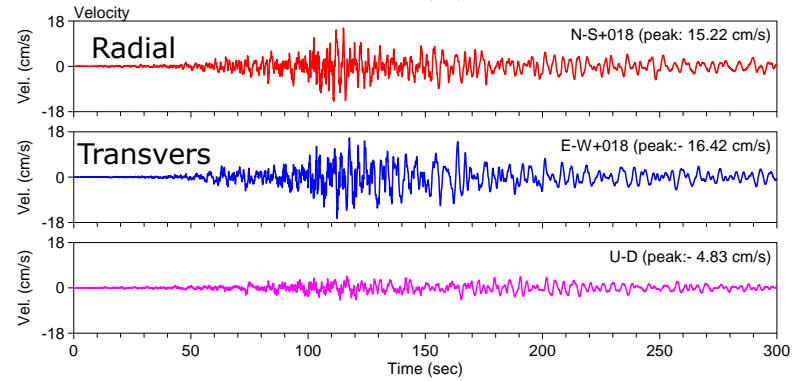
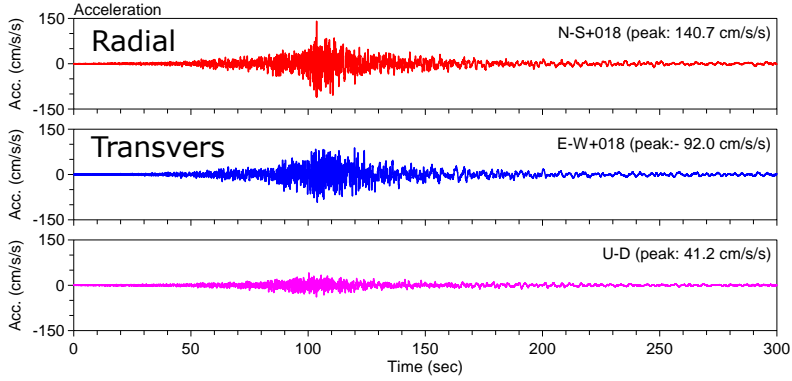
地震観測点「CHB009 千葉」は、千葉市中央区新港 1 丁目に設置してある。この場所は埋立地上であり千葉市役所敷地内である。計測震度は 5.1 (5 強) と大きい。最大速度も 26.9cm/sec と大きい。しかし、この敷地では液状化—流動化現象はみられない (図 9 の「CHB009 千葉」)。

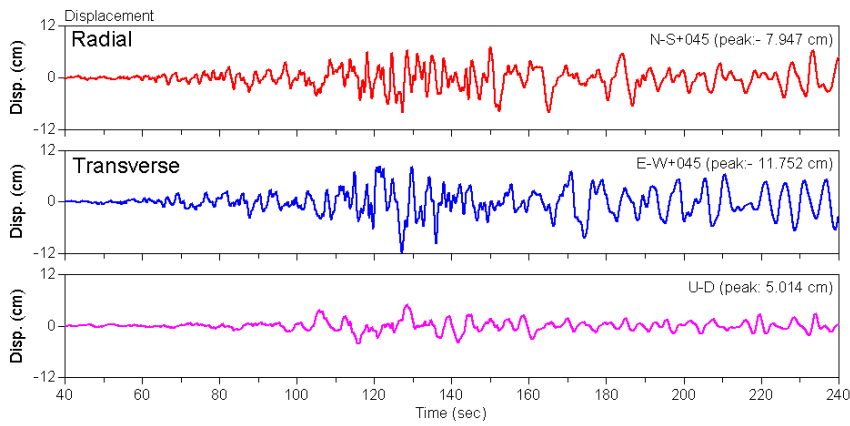
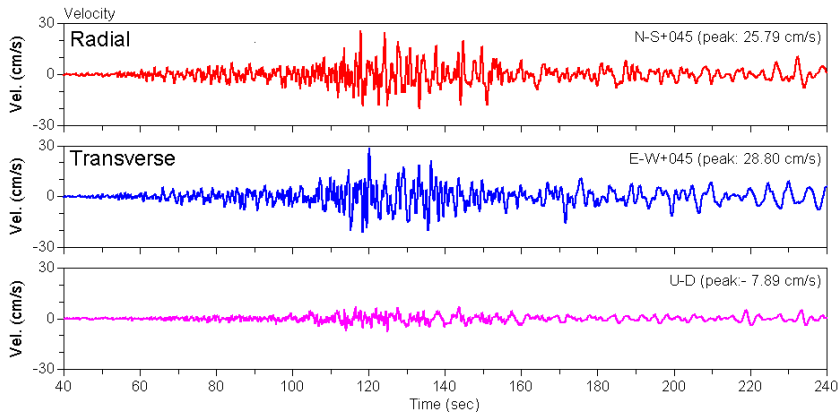
地震観測点「CHB024 稲毛」は、千葉市美浜区稲毛海岸 3 丁目に設置してある。この場所は埋立地上であり本センター地質環境研究室の地震観測施設内に設置してある。この場所は液状化—流動化対策は行なっておらず、今回の地震時にはこの敷地内において多数の噴砂がみられた。計測震度は 5.3 (5 強)、最大速度は 31.6cm/sec と大きい (図 9 の「CHB024 稲毛 太平洋沖地震」)。なお、この付近は人工地層の厚さは約 4.8m、沖積層基底の深度は 31m である。沖積層の基底深度はこの周囲では一般に 15m 程度であるのに対し深く、これは氷河時代に形成された侵食谷の中に観測点があるといえる。この観測点は K-net 観測点の前には、防災科学技術研究所の強震観測点となっており東方沖地震時の地震波形も得られている (御子柴ほか, 1990 英)。この地震時には、敷地内では噴砂がみられないものの、隣接地 (約 100m 内陸側) で噴砂がみられた。この時の計測震度は 5.0 (5 強)、最大速度は 22.4cm/sec である (図 9 の「CHB024 稲毛 東方沖地震」)。

以上のデータより、東京湾岸埋立地においては、震度階 5 強の揺れでは液状化—流動化現象がみられ

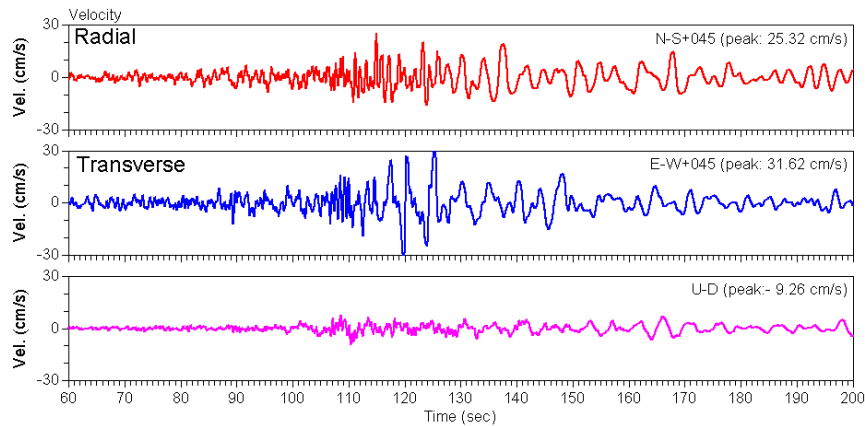
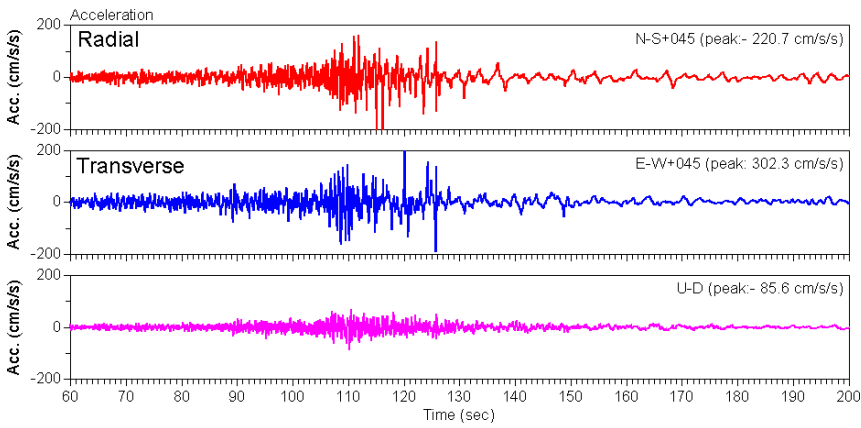
るものの、5 弱の揺れではほとんどみられていないといえよう。また、最大速度についてはデータが少ないものの 22~27cm/sec 付近が液状化—流動化現象の発生の境といえよう。今後の市町村設置の震度計の地震波形データの解析に期待するところである。

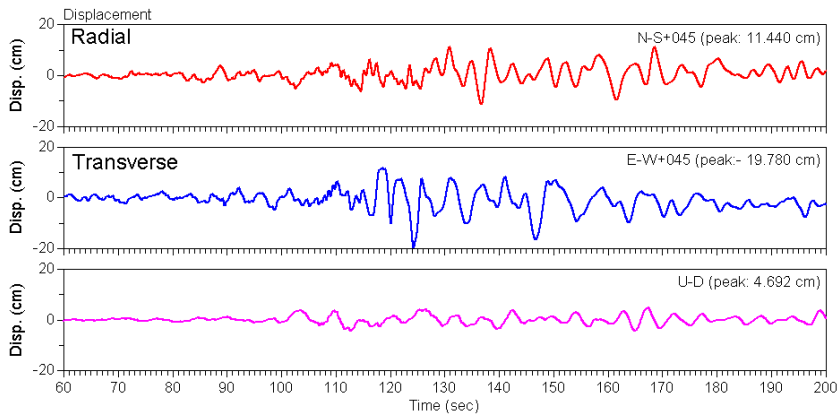
袖ヶ浦





CHB024 稲毛 太平洋沖地震





CHB024 稲毛 東方沖地震

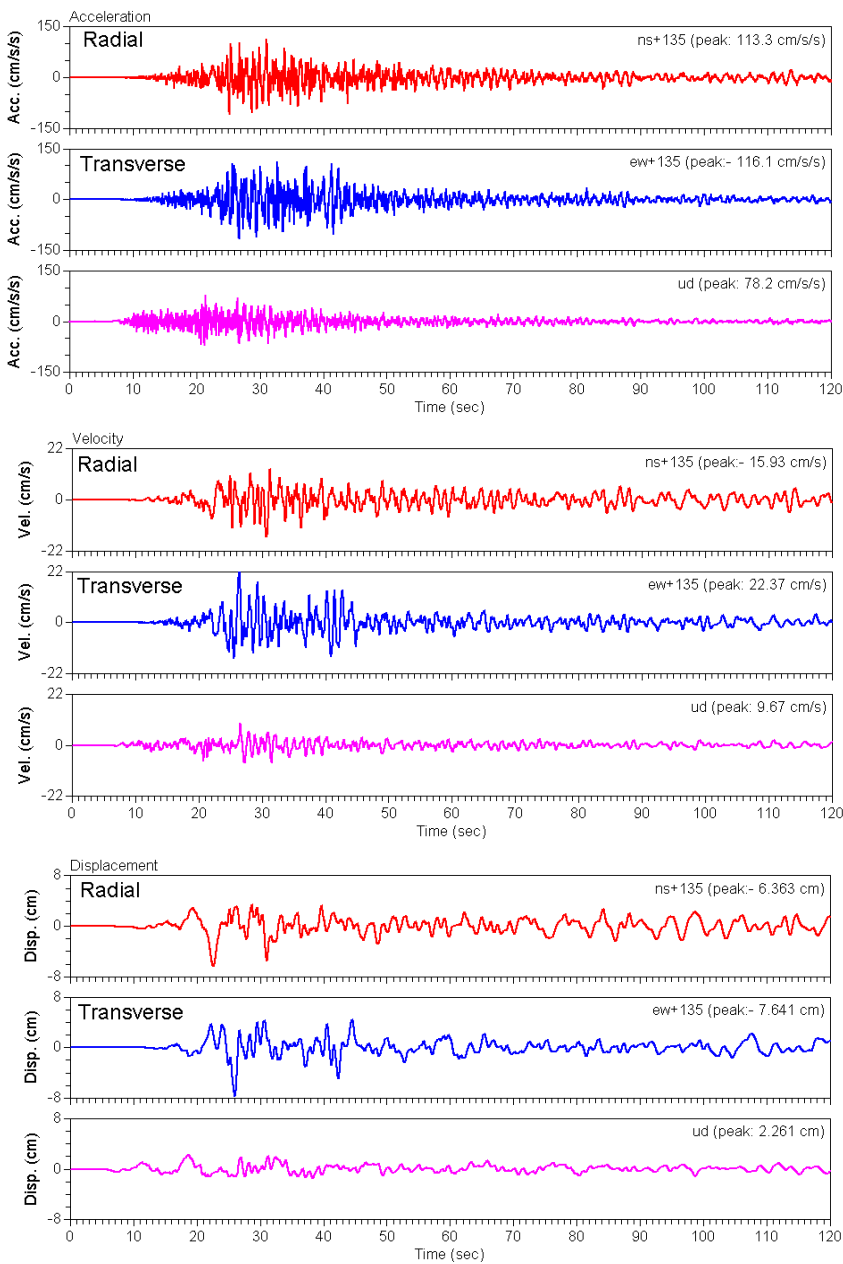


図9 各観測点で得られた地震波形.

液状化－流動化現象の再現性（再液状化）

第一報に示した太平洋沖地震時の液状化－流動化現象の集中帯の B 帯と C 帯（図 10）の中心部付近では、図 11 に示すように東方沖地震時には、噴砂が断続的に分布していた。このようなことから、次のことが考えられる。①この帯内では地震のたびに液状化－流動化現象が発生しているといえる。②東方沖地震時には液状化－流動化現象の分布範囲は小規模であった。これは、地震動の規模が小さかったことによると考えられる。すなわちこの時は、最も液状化しやすい条件の部分においてこの現象が発生したといえる。③よって、液状化－流動化現象が起こった部分では、再び同現象が発生しやすいといえる。

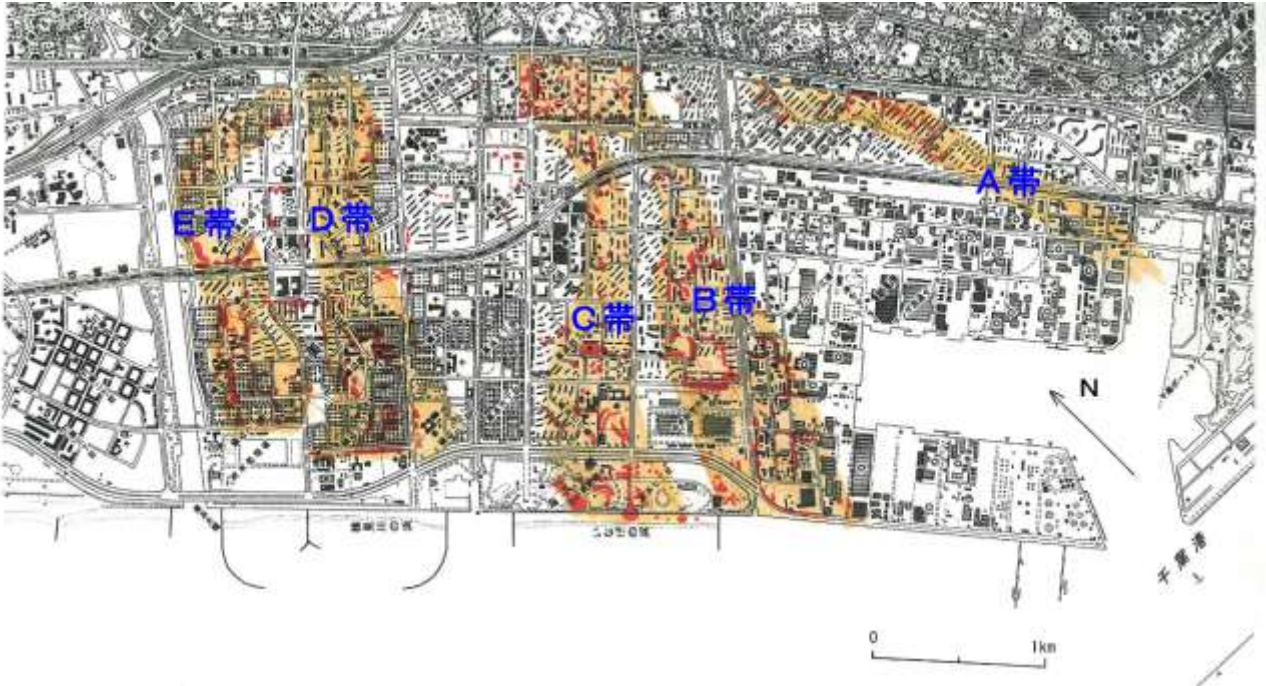


図 10 東京湾岸埋立地（千葉市美浜区幸町～磯辺）における液状化－流動化被害分布
赤は大規模な噴砂ないし噴砂の集中域，オレンジは液状化－流動化現象の集中帯を示す。（千葉県環境研究センター，2011）

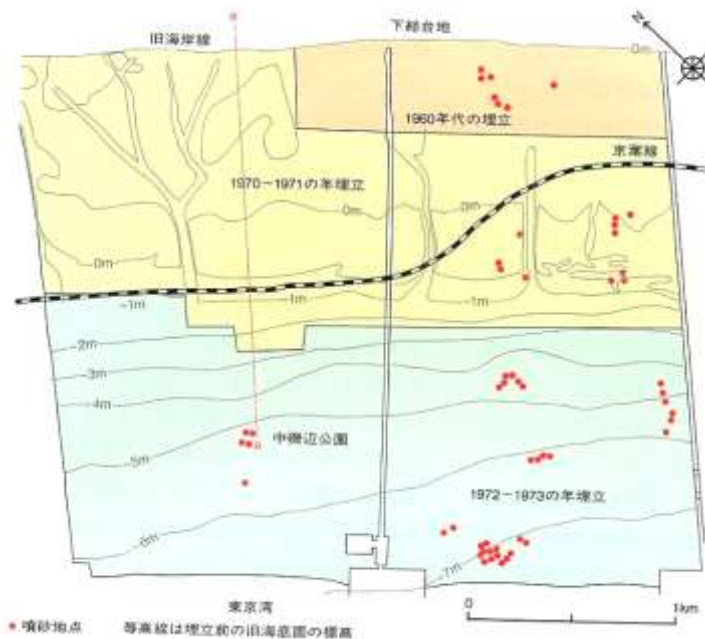


図 11 千葉県東方沖地震時の液状化－流動化被害分布（千葉県地質環境研究室原図）

液状化－流動化による地層の攪乱の影響（地耐力の変化）

東方沖地震で発生した液状化－流動化現象のメカニズム解明を行った調査の結果では、ほとんどの場所で液状化－流動化により地層の強度は大きく減少していることが明らかとなってきている。ここでは、代表例として香取市石納、一宮町東浪見、千葉市美浜区（中磯辺公園）の例を紹介する。

1. 香取市石納

房総半島における液状化－流動化現象のメカニズム

－サンドポンプ工法による埋立地での液状化－流動化被害調査結果－

房総半島を構成する地層は、古い順から古関東深海盆、遠浅の海、湖沼に堆積したものであり、細粒な砂層や泥層から構成されているという地質学的な特徴を有している。このため、これらが人工地層の材料となっており、人工地層の多くは細粒砂層や泥層から構成されている。東方沖地震では、埋立地や盛土地といった人工地層分布域で液状化－流動化現象が広く発生し（図 11）、他の都道府県とは異なる液状化－流動化に関する様々な現象がみられた。そこで、これら現象が発生した地点において、当時の関係者の証言や写真などから噴砂位置を特定し、その周辺で地質調査を行い、液状化－流動化現象のメカニズム解明を本センター地質環境研究室が行っている。

東方沖地震時に香取市石納において液状化－流動化現象により形成された噴砂孔においてトレンチ調査をおこなった結果、細粒砂を主体としたサンドポンプ工法による埋立層が液状化－流動化したメカニズムが明らかになってきた。その結果を図 12 に示す。

この場所は、明治中ごろまで蛇行していた利根川の河道であった。洪水予防のため明治末期から利根川の河道を付け替え、ここはその後三日月湖となり、昭和 20 年代に利根川の浚渫砂をサンドポンプ工法によりここを埋立て、水田として利用していた。

図 12 は調査地の概念的な地質断面図をもとに液状化－流動化現象がどのように発生し終了していったのかを示した図である。まず地震動によって地下水位（各図の左側にある▽の位置が地下水面）が上昇し（いいかえれば間隙水圧が上昇することになる）、地下水面が地表を越え始めた時にゆる詰まりの人工地層内において部分的に液状化（埋め立て地層内の白抜き部分）が生じ始める。この液状化部分は次第に拡大していき、液状化部分同士が側方に連続するようになる。深部の液状化部分の水圧も上昇しついには液状化していない層の薄くなった弱い部分から地表へ向かって深部の液状化した部分が流動をはじめ、この流動化によって液状化部分は攪乱される。砂を主体とした地層粒子は地下水の流出に伴い、地表に噴出し噴砂丘が形成される。この地下水の流出により人工地層内の水圧は減少していき、流動化

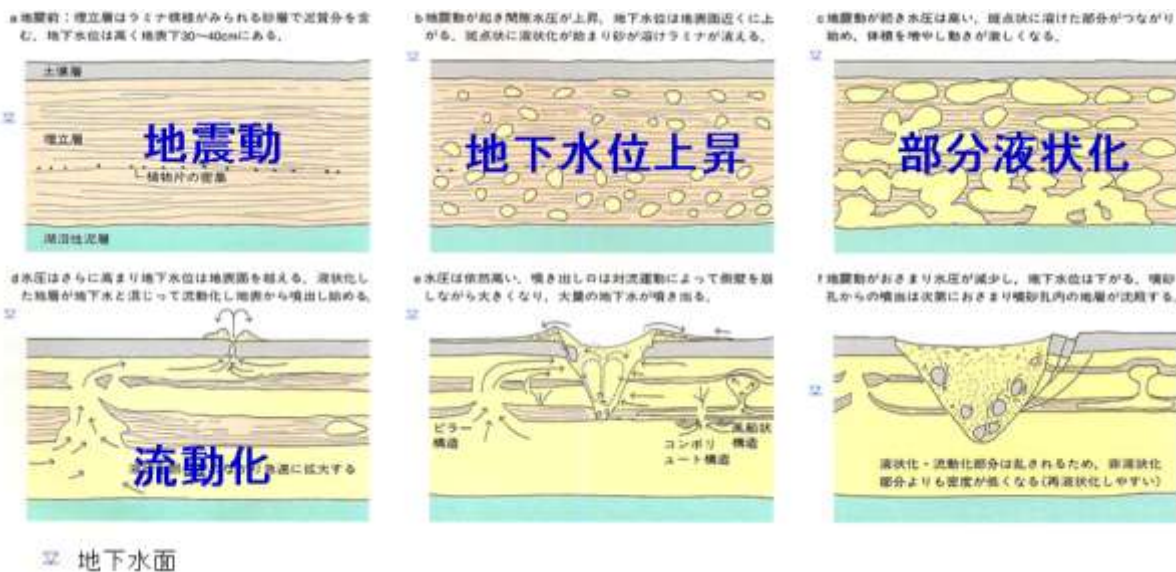


図 12 香取市石納での液状化－流動化現象のメカニズム（風岡ほか，1994）

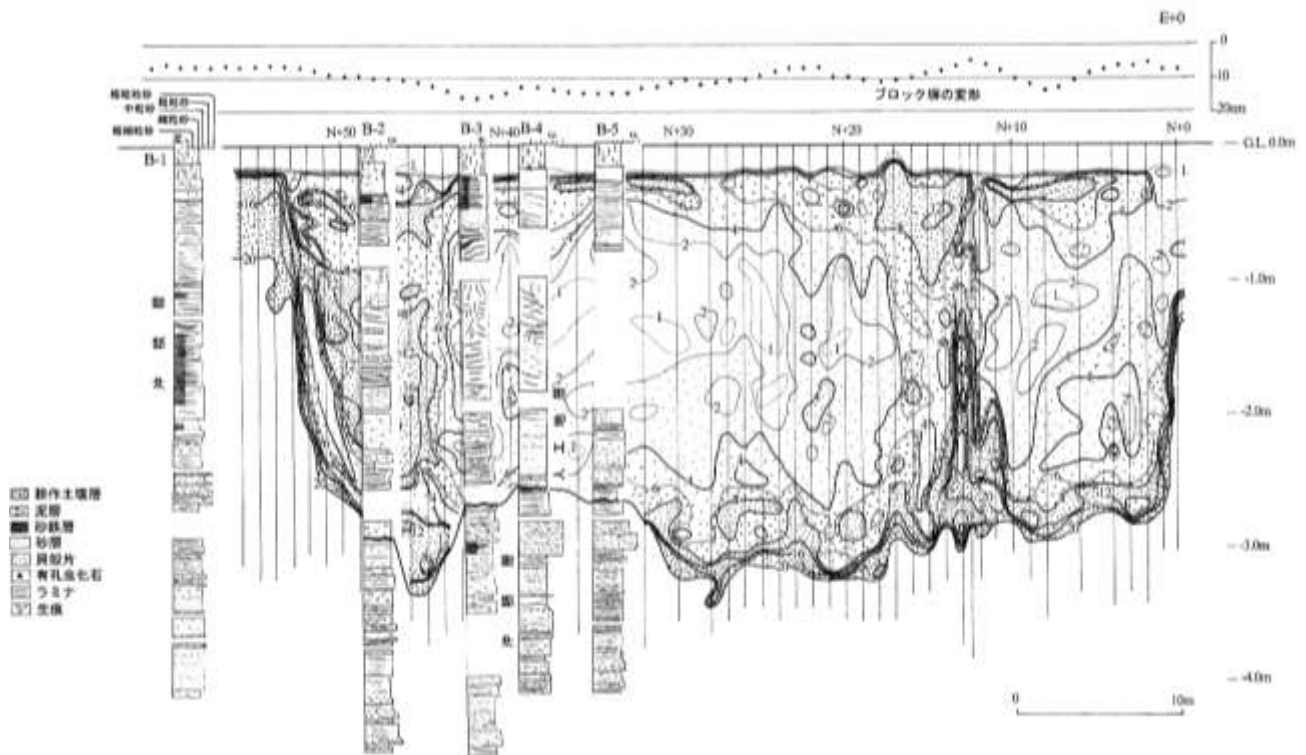


図 13 一宮町東浪見における水田中のブロックの仕切りの変形状況と、その場所の地質断面 (風岡ほか, 2004)

部分も地層粒子が序々に再堆積し、地盤の沈下がおこる。このため、噴出後はしばらく地盤の沈下が継続する。また、液状化—流動化部分の多くは締め固まらず、以前よりも緩くなっていることが多い。国内の他の地域では粗粒な地層が多く液状化後は締め固まる場合も見受けられるようであるが、房総地域では細粒な地層であるため、このような現象がみられるものと思われる。

先に述べたように、今回の太平洋沖地震では、東方沖地震時に液状化した部分も含め、より広い範囲で液状化—流動化が起こっており、再液状化—流動化が実際に発生したといえよう。

2. 一宮町東浪見

液状化—流動化現象に伴う地層の硬さ（地耐力）の変化と地波現象

—砂鉄採取跡地での液状化—流動化被害調査結果—

図 13 は一宮町東浪見での地質断面である。九十九里平野南端のこの付近には、沖積層の瀬海成の砂層中に砂鉄を多く含んでおり、これを採取するため 3m ほど掘削し、砂鉄を採取した残砂をサンドポンプ工法によって掘削した穴に埋め戻していた。東方沖地震の際にはこの砂鉄採取跡地の一部において液状化—流動化現象が発生し、噴砂やブロック塀・家屋の沈み込み、道路や塀の波打ちが生じた。

調査は東方沖から 16 年後の 2003 年に行った。ここでは、液状化—流動化により水田の境界のブロックが波打ったものの、補修の必要はないので現在でもそのままになっている。このため、ブロックの変形と液状化—流動化との関係を明らかにしやすい。図 13 は調査結果を地質断面図に表したものである。調査は斜面調査用簡易貫入試験装置を用いて、ブロック塀に沿って 2m 間隔で深度 3.4m 程度まで行い、地層の硬さの分布を明らかにした。図中の数字はその硬さ (Nc) の分布 (大きい数字ほど硬い) を示している。その後、オールコアボーリングを行い、地層の液状化—流動化の状態を観察した。その結果、おおむね $Nc=8$ 以上の部分はラミナ (地層形成時にできる模様) がみられ液状化—流動化していないものと考えられる。 $Nc=4$ 未満の部分は、ラミナは消えたり変形したりしているので、液状化—流動化した

と判断できる。すなわち、液状化し流動化するとその部分は攪乱されるのでゆる詰まりとなっていると考えられる。そして、地震から16年も経過しているにもかかわらず N_c が1~4の部分広がっている。

一方、ブロックの変形をみると、いくつかの地震の際の液状化—流動化被害調査のさいに、液状化—流動化したところにおいて、地面が海の波のように波打つ現象についての目撃証言を聞いている。また、今回の地震時にも、東京湾岸埋立地において本センターの研究者も目撃している。このようなことからこのブロックの変形は、この地波現象によるものと推定される。

3. 千葉市美浜区（中磯辺公園）

液状化—流動化現象に伴う地層の硬さ（地耐力）の変化と東京湾埋立地での最も液状化しやすい部分について

—東京湾岸埋立地における液状化—流動化被害調査結果—

図14は千葉市美浜区（中磯辺公園）での地質断面図である。この場所は、東京湾の干潟よりも沖合側を1970年代の初めに東京湾の海底の浚渫砂によって埋立てられ、東方沖地震時に亀裂が生じそこから細粒砂を主体とした噴砂が生じた。

図14の中央のBh99地点は、東方沖地震時に噴砂が生じた場所になる。1999年にこの亀裂に直行方向にオールコアボーリング・スウェーデン式サウンディング試験を複数本おこなった。噴砂がみられていないBh92地点では、1992年にオールコアボーリング・標準貫入試験・スウェーデン式サウンディング試験を行った。この断面図より、ここでは深度7~16mに人工地層と自然地層の沖積層との境界があり、人工地層は砂層と泥層とから構成されることがわかる。人工地層は砂層の上を楔状に泥層が覆っており、噴砂は楔の泥層の上端付近にみられている。また、人工地層の砂層は細粒砂を主体とし、その硬さは、一般に $NSW=25\sim150$ であるが、噴砂のみられたBh99付近では $NSW=0\sim25$ と極めてゆる詰まりの状態である。先に述べた石納での液状化—流動化現象のメカニズムからは、液状化に引き続き、その部分が流動化することにより元の地層は攪乱され、地層形成時のラミナは失われゆる詰まり状態となったものと考えられる。噴砂付近で掘削されたオールコアボーリングの際、深度1.5m付近の泥層の直下の砂層部分が液状化し、ここから泥層中の亀裂を通して噴砂が生じていることが観察された。そこで、液状化—流動化のメカニズムは以下のように考えられる。

- ① 難透水層である泥層が、透水層である砂層を楔状に覆っているため、地震動により砂層中の間隙水圧が上昇するものの、この上位を覆っている泥層が地下水の流動を妨げるため、泥層以深の砂層中の間隙水圧が高まり、泥層の直下の砂層部分が液状化した。
- ② これに連動して地波現象（楡井ほか、1986）が発生し、くさび状に砂層の上位を覆う泥層の中でも最も薄くなっているこの部分において地割れが生じ、ここを通して砂が噴出したものと推定される。
- ③ さらに、人工地層の泥層は砂層よりもさらに軟らかいので地震動の増幅が大きい。このようなことから、人工地層の砂層と泥層の境界部では大きな歪があらわれやすいので、この地層境界部が最も液状化しやすい部分と考えられる。

さて、東京湾岸埋立地においては人工地層内になぜ、砂層優勢部分と泥層優勢部分ができるのであろうか？ 埋立地を作る際には、埋立の外周に堤防（護岸）を作る。この中に沖合の海底の浚渫砂を海水とともにサンドポンプによって流入させ、埋積していく。このとき、浚渫砂には砂だけでなく泥質分も含まれており、ストークスの法則（水中では粒の大きな粒子ほど沈降速度が速い）に従いサンドポンプの噴出し口に近いところでは主に砂が堆積し、ここから離れたところでは泥が堆積する。噴出し口は埋立初期には護岸に沿って作られ、埋積が進むにつれパイプを足して埋立地の中央へ向かい噴出し口を進行させることになる場合が多いようである。また、流入した海水を排水する必要があり、このとき懸濁物質を沈積させるため、排水口の近くには沈殿池が作られる。ここでは、主に泥層が形成されることになる。このように埋立地の中では泥層が主体となる部分と砂層が主体となる部分が形成されることになる。ここで、砂層はゆる詰まりであり鉱物粒子（主な地層粒子）同士くっつき合う作用はごく小さいの

で、間隙水圧が高まれば液状化しやすい。しかし、泥層は一般に粘土鉱物を多く含みこれが鉱物粒子同士をくっつける作用をもつため液状化しにくい。東京湾岸埋立地内では同様な方法で埋め立てを行ってきたので、砂層を主体とし液状化しやすいつ部分と泥層を主体とし液状化しにくい部分が存在することになるものと考えられる。

さて、今回の地震では、この中磯辺公園では人工地層の砂層分布域全体にわたって噴砂・噴水が発生し50cm程度沈下した。これに対し、泥層分布域ではほとんど被害はみられていない（環境研究センター、2011 a）。すなわち、東方沖地震で液状化し流動化したところは再度液状化し流動化しているといえる。そして、今回も液状化し流動化により地層が攪乱され、ゆる詰まり状態になっている可能性が高い。

以上のようなことから復旧に当たっては、地盤の沈下が落ち着いたところでは地耐力が液状化する前に比べて低下していると考えられ、本格的な復旧の際には、地耐力を再度調査すべきであり、次の地震時の液状化し流動化に対する対策も考慮する必要がある。

対策の優先順については、単に技術的側面から考えれば、砂層を覆うように泥層がくさび状に覆っている最も液状化しやすい地層境界部分から最優先で対策を行うべきである。その後、順次液状化しやすい砂層部分を対策すればよい。

一方、街づくりの観点からは、例えばライフラインや緊急車両が通る主要道路が優先順位が高くなる場合もあろう。この辺りは、関係者が議論し優先順を決めていくことになるだろう。

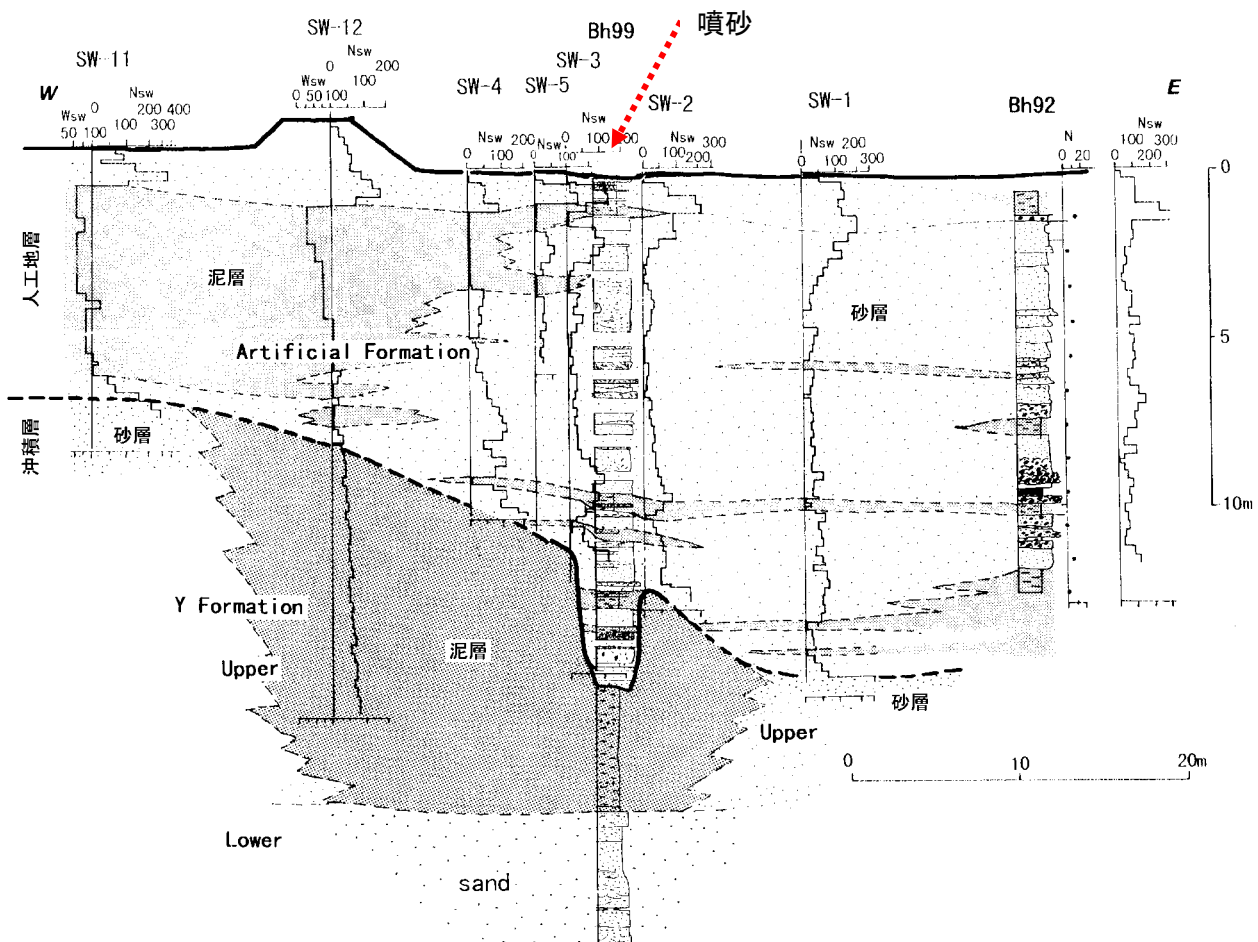


図 14 千葉市美浜区中磯辺公園の地質断面（風岡ほか、2000）

災害に強いまちづくりにむけて

これまでの東方沖地震、太平洋沖地震での調査結果や既存地質データより、今回の地震による液状化—流動化現象による被害の分布の要因について検討し、現時点において地質環境の視点から考えられる災害に強いまちづくりに関することを述べる。

1. 液状化がおこる3要素と液状化—流動化被害分布

液状化が起きるには以下の3要素がそろふ必要があるといわれている。①ゆる詰まりの砂である。②地下水位が浅いこと。③比較的強い揺れがあること。

図10に代表されるように東京湾岸埋立地においては、液状化—流動化現象の分布には、百mオーダーの大規模噴砂ないし噴砂の集中帯が存在する。また、それらの集中帯がkmオーダーでみられる。これら液状化—流動化現象が上記の3要素のうち、どの要素に起因するのかを検討してみる。

①に関しては、まず今回の地震での液状化—流動化現象がみられた場所はほとんどが埋立層や盛土層といった人工地層分布域である。このようなことから、人工地層の層相変化（砂層が側方へいくと泥層に変化するなど）に着目すると、中磯辺公園における層相変化は数十m～百mオーダーである。また、埋立時の航空写真ではサンドポンプの噴出し口は百m～数百m間隔であるので、層相変化も百m～数百mのオーダーの変化であると考えられる。このようなことから、図10にみられるような大規模噴砂や噴砂の集中帯がこのオーダーに一致する。一方、中磯辺公園においては、まさに人工地層の層相変化と液状化—流動化被害分布は一致している。よって、百mオーダーの液状化—流動化現象の分布域の変化には、人工地層の層相分布が大きく影響している可能性が高い。

②に関しては、埋立地は護岸で囲まれており、地下水位の側方への変化は少ないと考えられる。ただし、築山があったり池などがあり、地表面の高さが変わるので、これにより地下水面と地表との比高さが変化する。今回の地震では稲毛海浜公園において、築山の高い部分では噴砂はみられないが、親水広場の池の中では大量の噴砂が生じた。ここでの被害分布のオーダーは百mオーダーである。

以上の2点はkmオーダーの液状化—流動化被害の帯状分布の原因とはなりにくい。また、液状化防止対策は街の土地造成区画に合わせて行われることが多い。しかし、被害の帯の分布は千葉市美浜区打瀬などを除けば街の区画とも合わない。これらのことから、kmオーダーの帯状分布は、③の揺れの強さの変化と考えるのが妥当である。この揺れがこのような帯状に強くなる原因としては、人工地層の下位の沖積層の分布に起因する可能性が考えられる。今から約二万年前の氷河期には海面は現在よりも100m以上も低下し、東京湾は干上がり現在の川の河口から沖合延長上には深い谷が形成された。その後、縄文時代の間氷期となり海面が上昇し、深い谷には内湾性の泥層が厚く堆積し沖積層が形成されていった。そして干潟を備えた砂浜をもつ浅い海となり、その多くは埋立地となっていった。このように、埋立地の地下には氷河期～縄文時代に堆積した沖積層があり、一部には谷を埋め帯状に厚く分布しているところがある。これら谷の幅はkmオーダーである。また、沖積層は軟らかいので地震動を増幅する特徴を有する。このようなことから、kmオーダーの液状化—流動化現象の帯状分布は、谷を埋めて帯状に厚く分布する沖積層に起因する可能性が考えられる。データ数は少ないが既存のボーリングデータからは図10のB帯・C帯付近は沖積層が厚い傾向がみられる。なお、地質環境研究室はC帯の中に位置し、ここは沖積層が厚い。また、防災科学技術研究所が所有する強震観測網K-netの観測点となっており、5強のゆれが観測され、最大速度は31.6cm/secと大きい。図7より、東京湾岸埋立地の北部付近が震度階5強と5弱の境界部にあたることから、ちょうど表層地質の違いの影響が震度階分布として現れやすい条件にある。5弱の揺れの観測点では液状化—流動化被害がほとんどみられないことを考え合わせると、液状化—流動化被害の集中帯の外は沖積層の厚さが薄く地震動の増幅が小さいことが推定され、この部分は震度階5弱の揺れであった可能性が考えられる。

図15は、東京湾岸埋立地北部のこれら現象を概念化したものである。海岸に平行な方向の地質断面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。

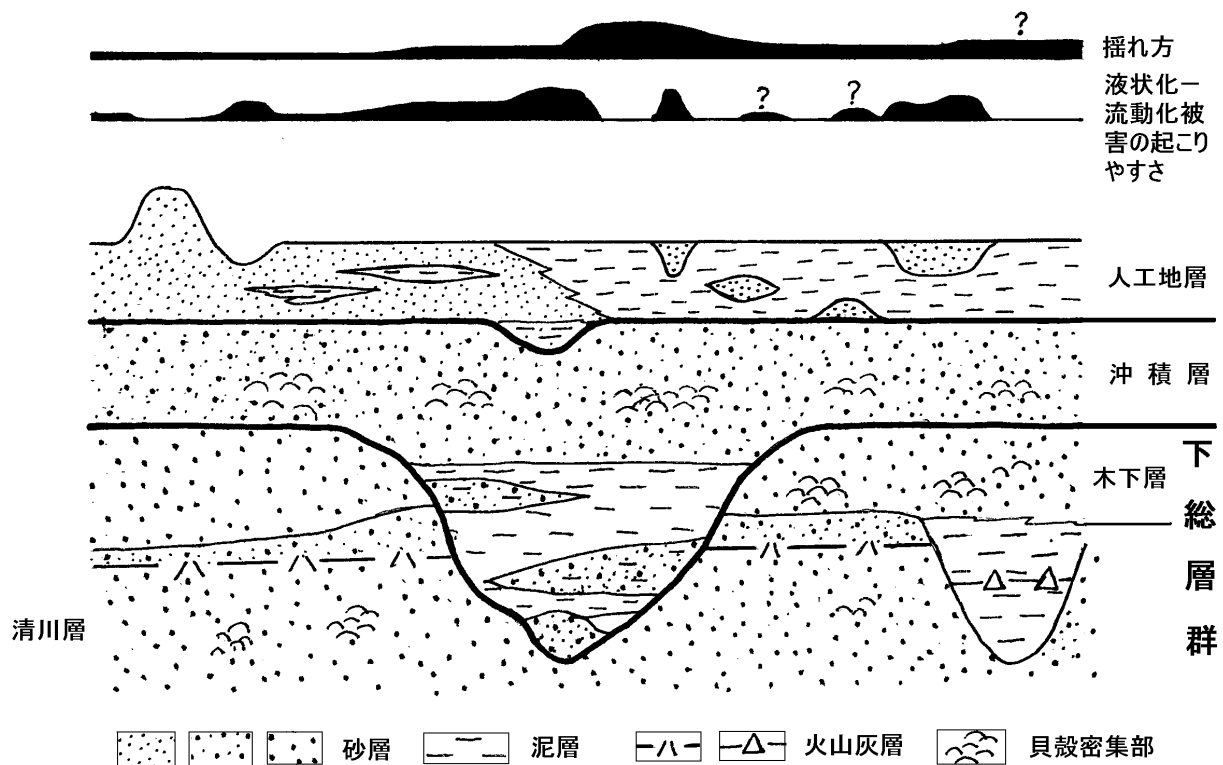


図 15 東京湾岸埋立地の地質構造と地震動・液状化—流動化被害との概念図
 地表のそれぞれの地点での揺れ方・液状化—流動化被害の起こりやすさを太さで示した。
 太いほどその強度が大きいことを示す。

氷河期に海面が低下することによって下総層群が侵食された。

その後、氷河期から縄文時代の間氷期に移り変わり海面が上昇しはじめた。この海面の上昇し始めの頃は、太平洋と東京湾との間の海峡部は狭く、湾内は波浪が及びにくい強内湾であったと推定され主に泥層が堆積した。この泥層中には河口に堆積した砂層も挟むことがある。

本格的な間氷期となり、海面もいよいよ上昇するに従い、東京湾の入口は広がり波浪の影響が及ぶ内湾となり、砂浜が形成されるようになる頃には谷の中は埋積され、広い浅海となり細粒な砂が堆積するようになった。なお、瀬海は波浪の影響を受け締め固まっていることが多い。

1960年代～1980年代初期に東京湾北部の埋立が行なわれ、始めは潮干狩りを行なう潮間帯を埋立て、その後その沖合いを埋立てた。この埋立地はサンドポンプ工法により作られており、先に述べたようにこの人工地層は砂層が卓越する部分と泥層が卓越する部分とが存在する。また、埋立ての過程の中ではサンドポンプの噴出口の移動により、泥層中や泥層の上にレンズ状に砂層が分布することもある。

こうして形成された埋立地が強震動で揺すられた時にどこが強く揺れ、どこがひどい液状化—流動化被害となると推定されるのかを断面図の上に示した。揺れについては、かつての氷河期の谷部分が強く揺れ、この上の人工地層の泥層部分は特に強く揺れる。また、沖積層が薄いところでは、人工地層が砂層の部分よりも泥層の部分は強く揺れる。一方、下総層群中にはもう一時代前の氷河期の谷の中に堆積した厚い泥層部分（断面図の右下）がありこの部分もやや強く揺れる可能性がある。

液状化—流動化被害に関しては、人工地層の砂層分布域におこりやすいことになる。このうち氷河期の谷の部分（断面図の中央）で特に液状化—流動化被害が起こりやすく、中でも砂層の上に泥層が楔状に重なる部分が非常に被害が起こりやすい。また、埋立地の標高が低いところでは被害が起こりやすく、

高いところは起こりにくい。泥層卓越域では起こりにくいものの、泥層の上にレンズ状に砂層が分布する部分は非常に被害が起こりやすい。一方、泥層中や泥層の下位に砂層がレンズ状に分布する場合も、何らかの被害が考えられる。また、このような地質環境の違いが、浦安地区の詳細調査でみられている地表での被害の現れ方の違いとなっている可能性がある。

2. 東京湾岸埋立地の液状化－流動化被害の予防・軽減にむけて

これまでの、地質環境条件と液状化－流動化被害についての議論をもとに、今後の調査や復旧・復興に向けて地質環境の視点からの考慮すべき点を以下に述べる。

液状化－流動化被害調査に関して

- ① 図 10 はあくまでも作業仮説である。このため、**液状化－流動化被害の集中帯を考慮し、人工地層・沖積層の層厚・層相の側方変化との関係をとらえる**ため、民間施設の既存基礎ボーリングデータの収集を進めるとともに、必要な地点の**地質ボーリング調査**を行なう必要がある。なお、この際地震動の増幅を検討するため**P-S 検層**（地震波の伝播速度）も行なうべきである。
- ② **人工地層のうち泥層卓越部分において、砂層がレンズ状に挟んでいる場合**や下位に分布する場合について、液状化－流動化被害の実態を調べる必要がある。これには、現在浦安地区などで行なっている液状化－流動化現象の詳細調査において、**地表での異なる被害の現れ方**がみられている。これらの代表的な地区において**系統的な地質ボーリング調査**を行なうことにより検討していくことが重要と考えられる。
- ③ 上記調査結果を受けて、**氷河期の谷や沖積層・人工地層の砂層と泥層の地震動の実際の増幅特性を明らかに**するため、人工地層が薄いかつての潮間帯部分の埋立地と、人工地層の厚い沖合い埋立地において、氷河期の谷の内側から外側にかけて人工地層の砂層卓越部分と泥層卓越部分を考慮し各 5 地点において**地表・人工地層基底・沖積層基底の 3 深度に地震計と間隙水圧計を設置し、観測**する必要がある。
- ④ 図 10 に示すように砂層中には貝殻などの硬い大きな粒子がレンズ状に含まれることがあり、標準貫入試験では高い値が出るものの分布範囲が数十 m オーダーであるので地震動への影響はほとんどない。すなわち、標準貫入試験結果をそのまま S 波速度に換算する方法では地震動の増幅の予測は難しいといえる。よって、今後先の地質ボーリング調査に加え、今後公共工事の際になるべく **P-S 検層**を実施しデータを収集し地質断面図を作成する体制作りが必要である。

復旧にあたって

- ⑤ 復旧にあたっては、液状化－流動化の発生と地層との関係、地下水の流動状況といった**液状化のメカニズムを明らかにし、計画的にかつ積み上げが可能な方法**（たとえば 1 年目は浅層のみを対策し翌年は深部の対策を行うといったように）で**対策を講ずることが重要**である。あらゆる災害・事故においていえることであるが、対処療法的に対策を行なうと最終的には非効率的な工事や周囲への悪影響を起しやすいためである。
- ⑥ 埋立地における構造物を作る際には**地層境界に注意**をする必要がある。これは、泥層卓越部分と砂層卓越部分が隣同士に接しているところでは、地震動による揺れ方が異なるので、その境に大きな歪が生ずる。特に、地下ライフラインの再設置などの際にはこの部分でのジョイント部には余裕を持たせる工夫が必要であろう。
- ⑦ **液状化－流動化が起きると**、大部分はゆる詰まり状態となり、**それまでの地層の硬さとは変化**している（図 13・14 参照）。このため、復旧工事やなどの際には、地層の強度と種類（泥層・砂層や塑性など）を把握する地質ボーリング等を行い現状での側方流動などの可能性や次の地震時の再液状化－流動化の可能性を検討することが必要である。ゆる詰まり状態を知らずに工事を進めると隣接

地に盤膨れなどの悪影響を及ぼす可能性がある。

- ⑧ 液状化対策を行なうには、地下水の流動を考慮することが重要である。このため、液状化予防対策にはドレーン工法が適していると考えられる。モルタル注入やセメント混合処理などの地層の透水性を低下させる対策を行うと、地下水の上流側で地下水位が上昇し、そこでの液状化―流動化被害を起こしやすくさせることになる（楡井，2003）。

やむを得ずセメント固化などのような難透水性の地盤改良やコンクリート壁の設置が必要な場合は、地下水流動の上流域での地下水位の上昇を解消することも同時に行なう必要がある。

- ⑨ 有害物質取り扱い場所では、有害物質の深部への汚染のおそれがある。このため、調査対策には地質汚染ガイドラインも考慮する必要がある。また、地下の透水層構造も考慮し、難透水層の止水能力を損なわないように予防対策を行なう必要がある。

災害に強いまちづくりにむけて

- ⑩ 埋立て護岸の耐震化と埋立地外周部分の液状化防止対策の重要性

第2報で紹介したように、護岸の一部が今回の地震で崩れた。これによりこの近隣では液状化―流動化に伴う地滑りなどで、地表面の大きな変形や構造物の損傷がみられた。また、1995年阪神―淡路大震災では護岸の破損を伴う液状化―流動化現象の結果、護岸から数百mの範囲に大きな被害が発生した（香川ほか，1995a；香川ほか，1995b；楠田ほか，1996）。今回は揺れが小さかった東京湾岸埋立地の南部地区も含め埋立地のこの部分の対策は特に重要と考えられる。

- ⑪ 主要幹線道路の液状化対策

特に今回の地震ではライフラインの切断が市民生活に大きな影響を及ぼした。中でも、大量の噴砂の流れ込みや液状化―流動化現象そのものによる下水道の使用不能は影響が大きく、炊事・トイレ・風呂の使用ができなくなった。緊急車両の通行の確保とともに下水道を中心としたライフラインの確保のため、主要幹線道路の液状化対策が特に重要であろう。

- ⑫ S波の減衰効果の活用

液状化―流動化被害の著しかった戸建て住宅では瓦屋根の損壊はほとんどみられない。また、住人の方からは大きな揺れがなく棚から物が落ちるなどはなかったとの証言を多数いただいた。1995年阪神―淡路大震災の際にも同様であった。このことから、液状化の最中はS波が伝わりにくくなることが推定される。斜面のない平場の埋立地では、フローティング基礎の戸建て住宅とするなど、液状化のS波の減衰効果を利用することも今後の対策の一つとなろう。

- ⑬ 非常用水源としての地下水

千葉市美浜区の埋立地では、東方沖地震や1995年阪神―淡路大震災の教訓をもとに、多くの自治会で井戸が設置されている。これら井戸は、日常的にも利用されている。震災のため、上水道が止まったところでは、この井戸が活躍した。避難場所となっている公民館や学校、コミュニティーセンターなどでも井戸を設置しておくが良い。千葉県内の埋立地ではどこでも地下水は豊富にある。なお、井戸はメンテナンスや地下水質のチェックのためにも日常的に利用していることが必要である。非常用として使っていないと、その存在が忘れ去られたり、ポンプが錆付いて動かなくなっているなどのこともあるようである。

- ⑭ 避難施設の自立性の確保

最悪の事態に備えて、避難施設では井戸の設置、風力・太陽光などの自然エネルギーなどによる自家発電施設の設置、耐震性の合併浄化槽とその排水の自然流下の確保といった、自立性の高い避難施設が重要である。

- ⑮ 自然の法則にマッチしたまちづくり

今回の震災は地質環境の違いが被害の現れ方に大きな影響を与えた。よって、地質環境などの自然の法則にマッチした街づくりが低コスト・低炭素社会・そして持続的社会的のためには必要である。

⑯ 災害教育としての地学教育の重要性

このような自然災害を取り扱う分野は、理科の地学分野である。地学分野の中において、地震だけでなく、地震の際たびたび地質被害が生じている人工地層・沖積層・新生代層といった地層や地下水に関する事、またこれら地層から構成される大地で見られる地盤の沈下・地質汚染やこのような被害の予防・修復による持続的利用を取り扱う必要がある。

その他

⑰ 噴砂の利用について

海浜の養浜に利用するのも一つの考え方であろう。もともとは東京湾および古東京湾の海底に堆積した地層を掘削して埋立地に堆積させた砂である。この砂が液状化―流動化によって地表へ噴出したものである。このように考えれば、噴砂は養浜として利用し海に戻すことが一つの考え方と思われる。ただし、人工的に汚染された汚染地層の噴砂は適正な処理が必要である。

⑱ 木の効用

比較的大きな木の下には噴砂は少ない傾向がある。これは、木の重さにより上載圧が増加するので、その分液状化しにくくなることが考えられる。

⑲ 土地の利用形態の再検討

被害状況や液状化対策の費用対効果および潜在的な地質環境を考慮し、場合によっては利用形態の変更も視野に入れ、土地の利用形態の再検討も考慮する必要があるだろう。

引用文献

- 千葉県環境研究センター，2011，平成 23 年（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），8p.
- 千葉県環境研究センター，2011，2011，平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による千葉県内の液状化―流動化被害（第 2 報），8p.
- 地震予知総合研究振興会，2011，地震加速度情報 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分。
<http://www.adep.or.jp/shindo/Screen/C123380.html>.
- 香川ほか，1995a，1995 年兵庫県南部地震における液状化―流動化現象 ―人工島の液状化現象(1)―。第 5 回環境地質学シンポジウム論文集，13-18.
- 香川ほか，1995b，1995 年兵庫県南部地震における液状化―流動化現象 ―人工島の液状化現象(1)―。第 5 回環境地質学シンポジウム論文集，19-24.
- 風岡ほか，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・討論会 講演要旨，125-126.
- 風岡修，2003，液状化・流動化の地層断面。アーバンクボタ 40 号「液状化・流動化」，5-13.
- 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，2001，局所的な表層地質の違いが液状化―流動化に与える影響 ―東京湾岸埋立地の例―，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，地震時にみられた液状化―流動化現象とその時系列変化―2000 年鳥取県西部地震・2001 年芸予地震での例―，第 11 回環境地質学シンポジウム論文集，419-424.
- 風岡 修・佐藤光男・風戸孝之・楠田 隆・早川 実・笠原 豊・古野邦雄・原 雄・香村一夫・佐藤賢司・楡井久，2004，砂鉄採取跡地の液状化―流動化による地波形成部分の地質状態 ―1987 年千葉県東方沖地震時の九十九里平野での地質環境調査結果―，第 14 回環境地質学シンポジウム論文集，395-400.
- 楠田 隆ほか，1996，兵庫県南部地震にともなう大阪平野の地盤沈下，阪神・淡路大震災，東海大学出版会，

208-227.

楡井 久ほか, 1986, 地震動における地波現象と帯水層の液状化, 地質学論集, 27, 109-114.

Nirei,H., Kusuda,T., Suzuki,K., Kamura,K., Furuno,K., Hara, Y., Satoh,K., Kazaoka,O., 1990, The 1987 East off Chiba Prefecture Earthquake and its Hazard, Mem. Geol. Soc. Japan, no.35, 31-46.

楡井ほか,1995,阪神・淡路大震災での液状化・流動化被害,都市耐震センター研究報告,京都大学防災研究所, 9号,25-52.

楡井 久, 2003, 液状化対策 2. アーバンクボタ 40号「液状化・流動化」, 56-57.