

第4報 千葉県内の液状化－流動化現象と詳細分布調査結果

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

平成23年12月20日
千葉県環境研究センター

大地の持続的な利用と液状化－流動化現象

農耕や定住がはじまり、大地を意識して利用始めたと考えられる縄文時代より、われわれは多様な地質環境を有するこの大地を繰り返して使い続けている。この大地を持続的に利用するには、その場所の地質環境（大地の性質）を調べ、自然の法則を解き明かし、どのような自然現象が起こっているのかを理解し、さまざまな土地の能力を活かしていくことが賢明である。短期的な目的だけのために自然の法則に逆らって利用すればさまざまな地質災害・地質環境問題の原因にもなり、将来世代の人々が生活する支障となりうる。地質環境にマッチした大地の利用・開発が求められている。

1923年に発生した関東大震災の後には、帝都復興院（のちに復興局となる）が設置され、約4年間かけて地質調査が行なわれ、その結果を受けて災害に強い首都作りが計画され一部は実行されてきた。今回のような大きな地質災害が発生した際にまず重要なことは、どのような自然現象がどこで起こったのかを調べ上げることである。その結果として、従来知られていない、またはあまり注目されなかった重要な現象が明らかとなった場合には、そのメカニズムを明らかにすることである。このような作業を通じて、次の災害にどのように対応すべきかといった復興の方向性がみえてくるものと考えられる。

さて、今回の平成23（2011）年東北地方太平洋沖地震（以下「太平洋沖地震」と略す）では、震源から遠い千葉県では首都圏の中では非常に大きな被害を受けた。中でも液状化－流動化現象による被害は、首都圏の中では最も大きい。千葉県環境研究センターの稲毛地区では、その被災地の中にあり、敷地内に液状化－流動化現象が発生し施設に被害もあった。しかし、地震発生時より地質環境研究室員によって液状化－流動化現象の把握調査を進め、これまで第1報～第3報の被害報告（千葉県環境研究センター、2011a；2011b；2011c）を公表してきた。これは、本センター地質環境研究室はその前身の公害研究所地盤沈下研究室の時から1978年の宮城県沖地震より地震時の液状化－流動化現象に関する調査研究を続けており、特に1987年千葉県東方沖地震（以下「東方沖地震」と略す）からは同現象のメカニズム解明や国内・外の地震時の液状化－流動化被害調査を行なってきた豊富な経験があったことによる。また、この液状化－流動化現象は、地盤の沈下を伴うことから、これを未然に予測し予防することを調査研究の目標としていることにもよる。

太平洋沖地震による県内の液状化－流動化被害に関する本センターのこれまでの報告は、第1報では主に千葉市美浜区の被害の概況を示した。第2報では千葉県内の被害の概況を示した。第3報では、①浦安市の埋立地の概況、②今回の液状化－流動化現象の特徴、③東方沖地震より進めてきた液状化－流動化に関する調査・研究で得られたその発生メカニズムの解明結果の今回の液状化－流動化現象への適応、④地質環境の視点からの今後の復旧・復興に関する考え方をまとめた。本第4報では、①太平洋沖地震の地震動と液状化－流動化現象の分布および東方沖地震での液状化－流動化分布との比較などについて、②浦安地区の液状化－流動化被害の詳細調査結果、③千葉市美浜区での液状化－流動化被害分布と地質構造に関して、④今後の災害に強いまちづくりに向けてなどについて報告する。特に、③に関しては東方沖地震からの調査の結果も含めれば、液状化－流動化現象のほとんどは人工地層内で生じていることから、被害対策を実施するための調査を行なう深度の目安として暫定的ではあるが人工地層の等深度線を掲載した。

なお、東日本大震災の被害を受けて、国連の一機関であるユネスコ傘下の国際地質科学連合環境管理委員会（IUGS-GEM）でも、人工地層と液状化－流動化被害の関連の重要性に関する宣言がなされている（IUGS-GEM,2011）。

I 太平洋沖地震の地震動と液状化－流動化現象の分布および東方沖地震での液状化－流動化分布との比較ほか

1. 東日本での震度分布

震源は牡鹿半島の沖約 120km の大陸斜面の直下約 24km である。強くゆれた東日本における震度分布は、必ずしも震源を中心とした同心円状の分布にはなっていない。

地質構造が地震のゆれ方を規制する現象は、河角の震度階分布調査から角田ほか (1985)・長野県教師グループ (1987)・飯川 (1991) などによって実証されてきた。その後、1995 年阪神－淡路大震災以降大幅に増えた地震観測点によって楠田ほか (2001)・竹之内 (2001) は糸魚川－静岡構造線による震度分布の規制について報告している。

今回の地震による気象庁震度分布に主要な地質構造の位置を入れてみると、大局的には以下のような地質構造を境にゆれ方が変わっていることがわかる。この主要な地質構造とは脊梁火山列 (中川ほか, 1986) と地質構造線 (地質構造を支配する大きな断層) の一つである柏崎－銚子線 (山下, 1970)・糸魚川－静岡構造線 (矢部, 1918) であり、これを境にその強さが変化している (図 1)。

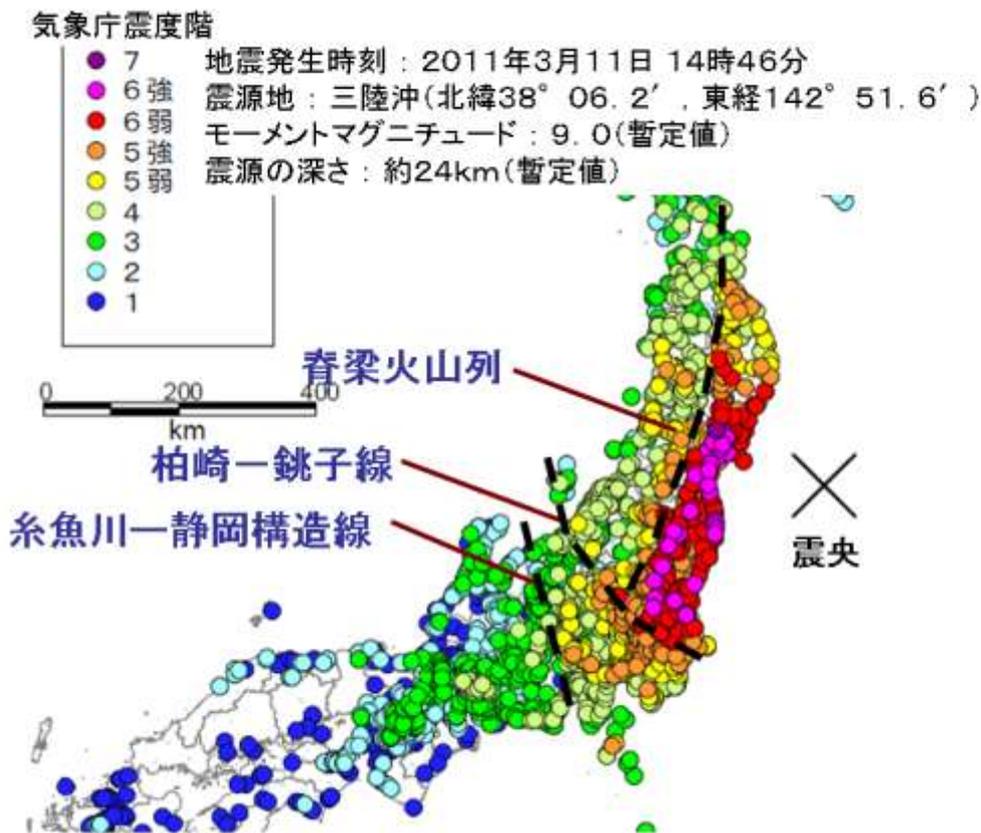


図 1 2011 年東北地方太平洋沖地震の震度分布図 (ADEP, 2011) と地質構造との関係。震度値は気象庁 (2011) による。

2. 関東堆積盆地のゆれと液状化－流動化現象の分布

太平洋沖地震では、震源が関東堆積盆地の北東約 400km と離れたところであった。この堆積盆地の北の茨城県中・北部では、震度 6 弱の強いゆれと震度 4 の比較的弱いゆれが混在している。しかし、この南西の関東堆積盆地内では、5 弱～6 弱が漸移的に分布し、北東ほど強いゆれとなっている。5 強以上の強いゆれは堆積盆地中央から北部にみられる。そして、この強いゆれの部分で液状化－流動化現象がみられている。なお、この現象がみられたほとんどのところは人工地層分布域である。



図 2 2011 年東北地方太平洋沖地震での震度分布。

気象庁（2011）の震度分布を基に作成された地震予知総合研究振興会（2011）に加筆。

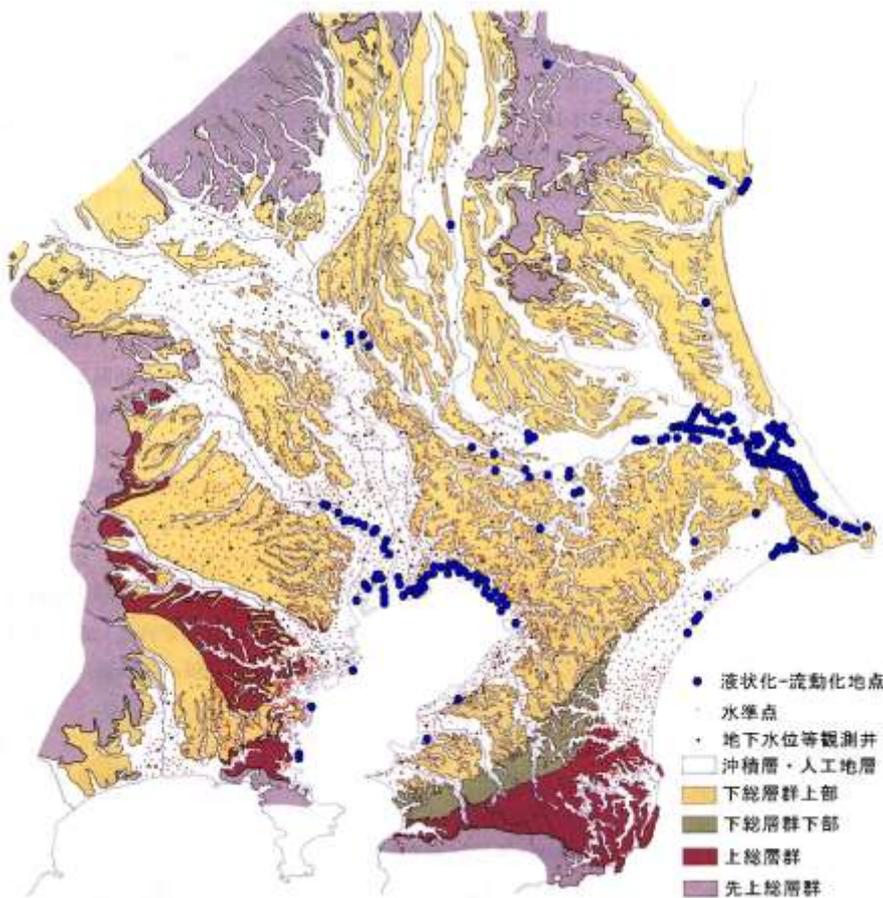


図 3 関東地下水盆中の太平洋沖地震での液状化－流動化現象の分布。

図を作成するにあたり、基図は楡井・古野（1988）を使用した。液状化－流動化被害地点のうち房総半島についてはこれまでの本センターの調査より、東京都の分布については江東区（2011）、江戸川区土木部沿川まちづくり課（2011）安田（2011）、神奈川県については関東学院大学地盤防災工学研究室（2011）、埼玉県の分布については桑野ほか（2011）、茨城県北部については東畑ほか（2011）、茨城大学工学部都市システム工学科防災・環境地盤工学研究室（2011a；2011b；2011c；2011d；2011e；2011f；2011g；2011h）、利根川沿いの河川敷と堤防については国土交通省利根川下流事務所（2011）、荒川沿いの河川敷と堤防については国土交通省荒川下流事務所（2011）より作成した。

3. 房総半島での震度分布と液状化—流動化現象の分布

これまでの当センターによる調査から、液状化—流動化現象は、東京湾岸埋立地・利根川下流低地・九十九里平野北部にみられる(図4)。これら被害のあった東京湾岸埋立地・利根川下流低地では、海域や湖沼といった水域をサンドポンプにより埋立た地域、九十九里平野北部では砂鉄採取のために掘削し、砂鉄採取後の残渣をその孔にサンドポンプで埋め戻した場所であり、いずれもサンドポンプによる埋立地を中心にみられ、盛土ではわずかししか発生していない。図4はこの現象の分布とゆれの強さを示す気象庁震度階の分布を重ね合わせた。図4左は14時46分の本震時の震度階分布、右は15時15分の最大余震時の震度階分布を重ね合わせたものである。なお、図5は、県内の強震観測点の位置図である。

東京湾岸埋立地では、本震時には北部で震度5強、南部で5弱であり、最大余震時には中央部で5弱がみられるもののほぼ全域が震度4であった。液状化—流動化現象は5強のゆれがあった北部でみられた。

利根川低地では、本震時には東庄町～銚子市では震度5弱であるものの、それ以外は5強～6弱と強くゆれていた。最大余震時には香取市～銚子市が5弱～5強のゆれであったが、この西では4～5弱であった。特に銚子市若宮町では本震時は震度4であったものの、最大余震時には5強のゆれとなった。液状化—流動化現象は本震と最大余震のいずれかで5強以上のゆれとなった地域で発生している。

九十九里平野では、旭市萩園・山武市蓮沼ハ・白子町関では5強であるものの、全域が5弱のゆれであった。最大余震時には匝瑳市今泉以北で5強以上の強いゆれであった。液状化—流動化現象は、本震と最大余震のいずれかで5強以上のゆれとなった地域で多く発生している。

液状化が発生しやすい条件は以下の3条件がそろうことである(最上・久保,1953 英; Seed and Lee,1966)。
 ①ゆる詰まりの細かい砂層であること。②地下水位が地表近くの浅い深度にあること。③強いゆれがあること。このことを適用すれば、東京湾岸埋立地や利根川下流低地の埋立地および九十九里平野内の埋戻部分は、常に①と②の条件下にあるので、③のゆれの強さに液状化の発生は強く影響されることになる。今回の地震では、本震と最大余震のいずれかで5強以上のゆれとなった地域を中心に発生している。ただし、袖ヶ浦市長浦のように5弱のゆれのところでも同現象が発生している例は少ないが存在する。

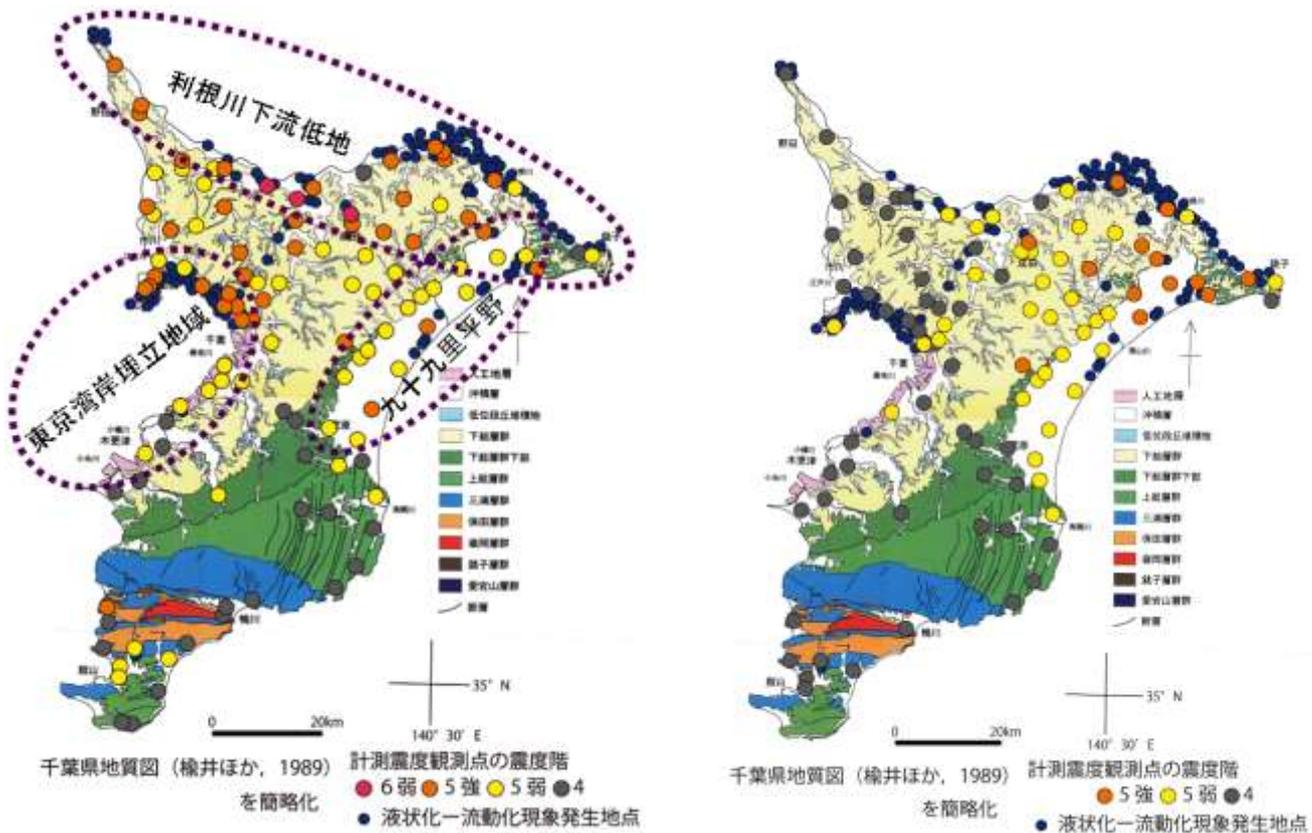


図4 房総半島での震度分布と液状化—流動化現象の分布 左が14時46分の本震, 右が15時15分の最大余震。震度値は気象庁(2011)による。

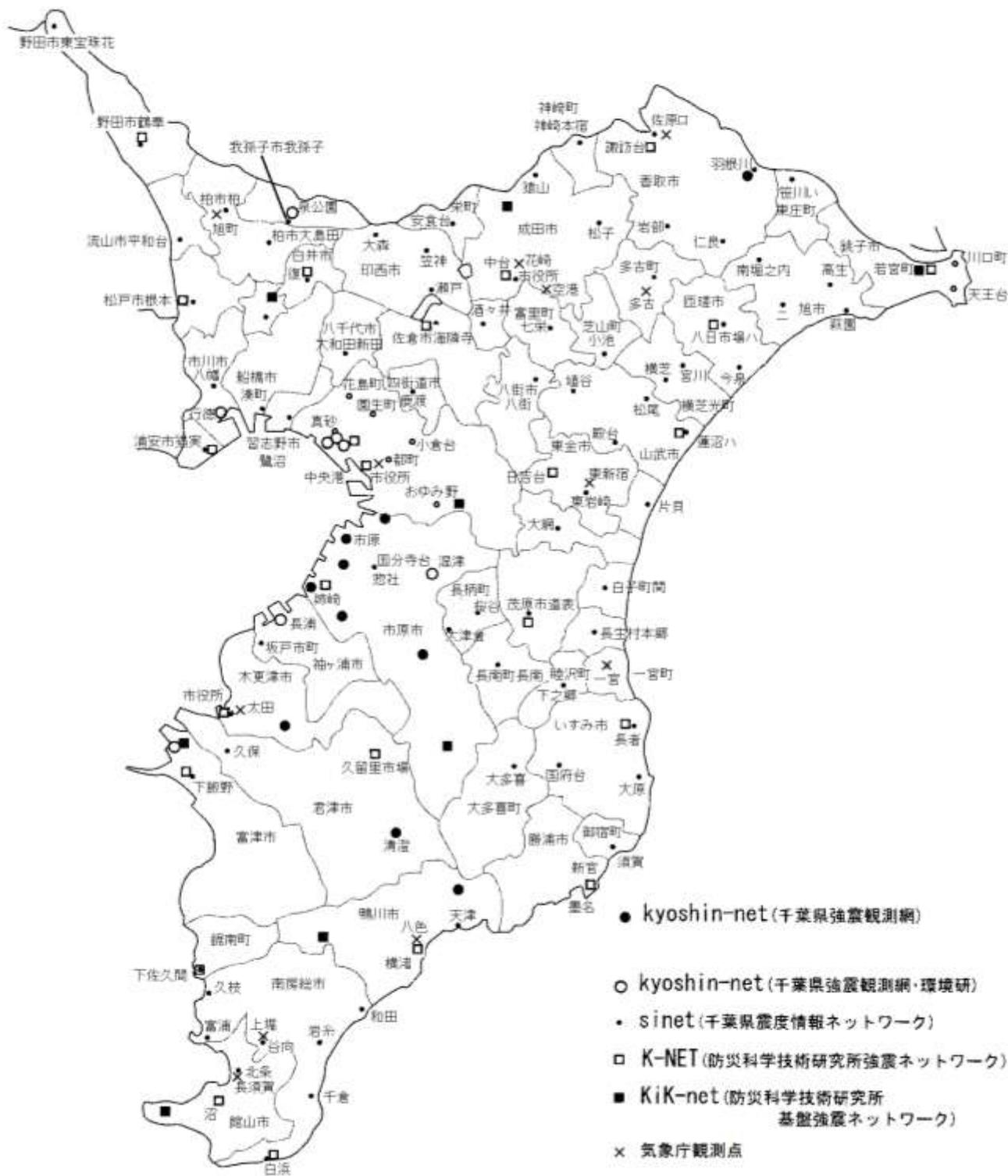
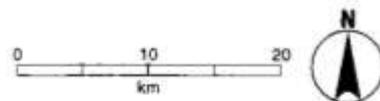


図5 千葉県内の強震観測点

4. 東方沖地震と太平洋沖地震の際の液状化—流動化分布の比較

東方沖地震では震源が一宮町の沖合いの深さ約60kmの房総半島のほぼ直下の深部であるので、房総半島全体が広範囲に比較的強くゆれ(図6)、液状化—流動化現象は広範囲でみられた(図7右)。太平洋沖地震では、震源が北東約400kmと離れていたことや深部地質構造などの影響から5強以上の強いゆれは房総半島北部にみられ、液状化—流動化現象はこの半島北部を中心にみられた。

房総半島北部をみると、東方沖地震時にこの現象がみられたほとんどの地点で、今回の地震でもこの現象がみられている(再液状化—流動化)。また、今回の方がその現象の分布範囲は広く、その程度は大きなものとなっている。例えば神崎町小松飛地では東方沖地震での液状化—流動化現象の分布は利根川に沿う三日月湖内の埋立部分に限られ、噴砂量も少なく、地盤の沈下もほとんどみられなかったが、今回は三日月湖周囲の湿地部分の造成地部分にもおよび噴砂量ははるかに多く、数十cm以上の地盤の沈下も発生している(千葉県環境研究センター, 2011b)。本報告で後に述べる浦安地区でも同様である。

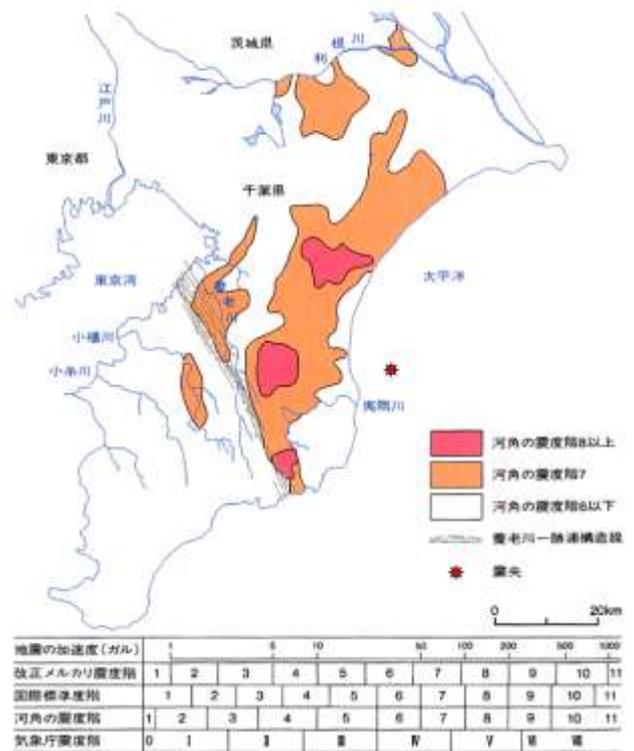


図6 東方沖地震時での河角の震度階分布(楡井ほか, 1990英; 千葉県地質環境研究室, 2003)

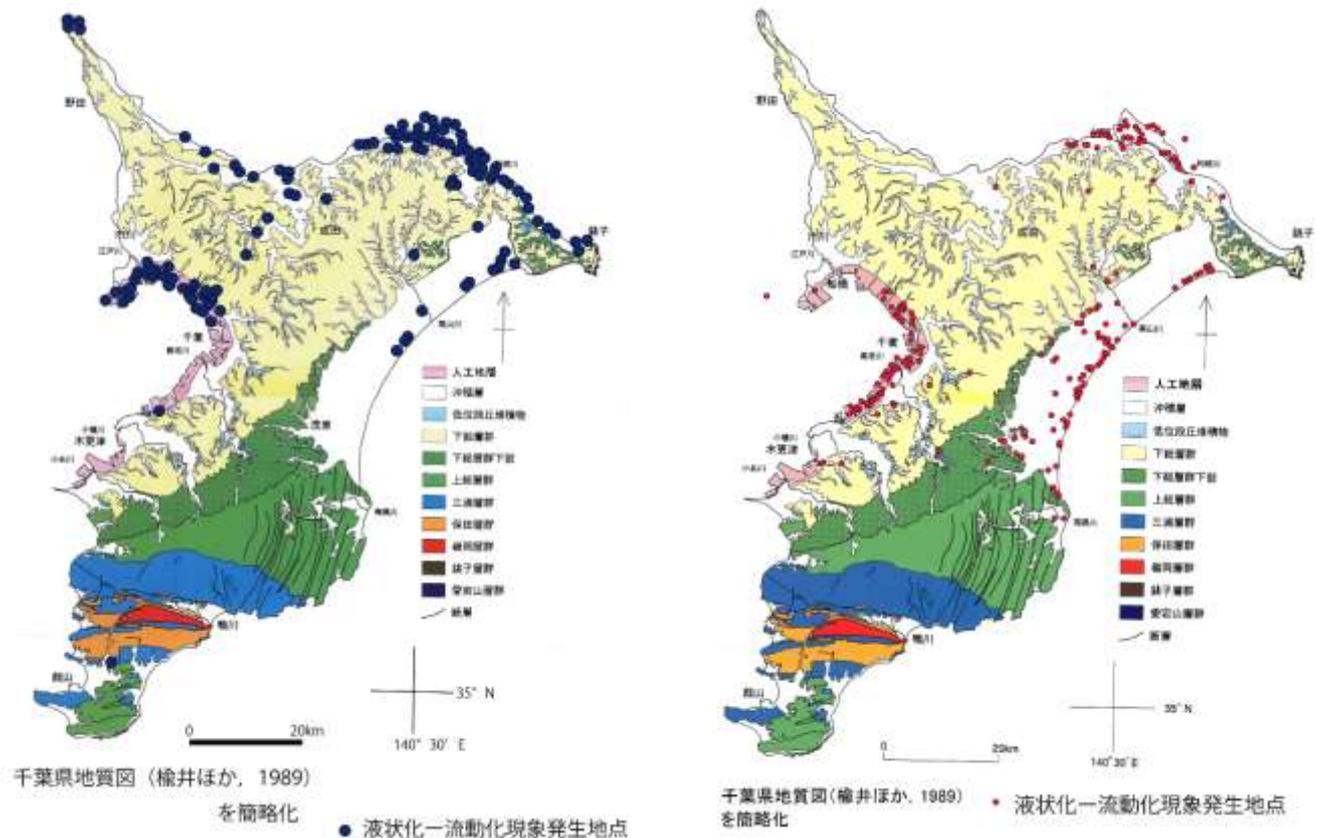


図7 太平洋沖地震(左)と東方沖地震(右)との際の液状化—流動化分布の比較

房総半島南部についてみると、東方沖地震では九十九里平野南部および東京湾岸埋立地南部において広く液状化－流動化現象がみられたが、太平洋沖地震ではほとんどみられていない。

東方沖地震時には県内には地震計がわずかしかなくゆれの状況が把握できず、このため河角の震度階アンケートによりゆれを把握した。これにより液状化－流動化は概ね河角の震度階7以上の地域で発生しているものの、必ずしもゆれと液状化－流動化現象の発生との関係は明らかにはなっていなかった。今回の地震では、県内において公共施設を中心に多数の震度計が設置されており、震度と液状化－流動化との関係が明瞭になった。すなわち震度階5強以上のゆれがあり人工地層が分布しているところでは液状化－流動化現象がみられている。また、5弱のゆれのあった人工地層分布域の一部においてもこの現象がみられている。

そこで、東方沖地震時に液状化－流動化が起こったものの今回は起こらなかった九十九里平野南部の一宮町東浪見の砂鉄採取跡地の地質環境についてみる。ここでは東方沖地震から16年後の2003年に調査をおこなった。この場所は東方沖地震時に液状化－流動化現象により地波がみられ、筑波丸東側製の斜面調査用簡易貫入試験機により簡易貫入試験をおこない、その値(Nc)が1~4といった極めてゆる詰まり状態のままであった(図8)。これは、同時に行なったオールコアボーリングの結果とあわせ、液状化に引き続く流動化および地波現象によって地層が擾乱を受けるためと考えられている(風岡, 2003; 風岡ほか 2005)。このようにゆる詰まり状態にもかかわらず、太平洋沖地震時には液状化－流動化現象は発生していない。このことから、人工地層を中心としたゆる詰まりの砂層が液状化－流動化を発生させるためには、ゆるめる時間が長いだけでなく、震度5強程度の比較的強いゆれが必要と考えられる。このことは、非排水振動三軸試験(液状化試験)において、ある程度の強さで繰り返し荷重をかけない限り、どんなに多くの繰り返し荷重をかけても間隙水圧の上昇が途中で止まってしまふ(Seed & Lee, 1966)ことと調和する。

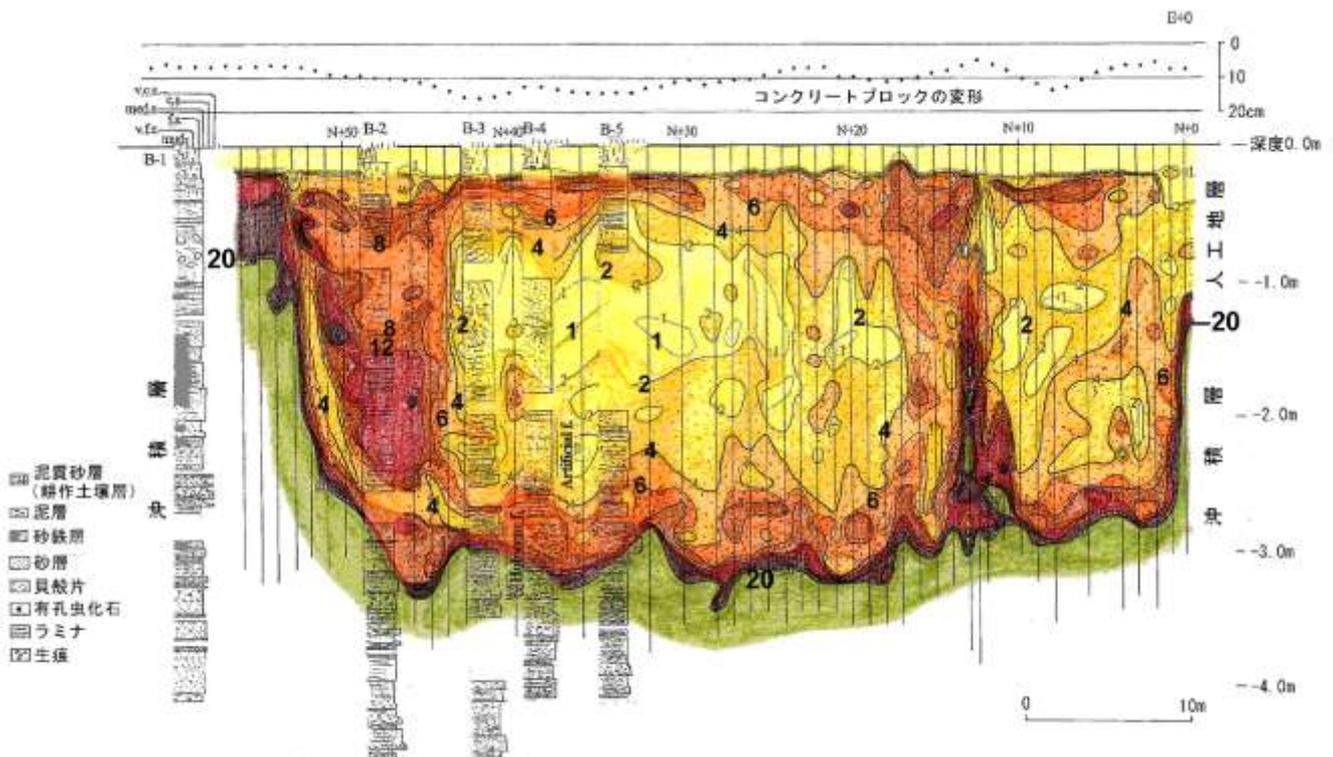


図8 一宮町東浪見における東方沖地震時に液状化－流動化現象による地波現象がみられた砂鉄採取跡地における地質断面(風岡ほか, 2004)。数字は地層の硬さNc(斜面調査用簡易貫入試験値)を示す。

人工地層はほぼ20以上と硬い。液状化－流動化部分は地層の初生的な堆積構造の乱れの状況から6未満の部分と考えられる。地震から16年後の調査であるが、液状化－流動化部分は緩詰まりのままであり、最も緩詰まりのところは1未満ととても軟らかい状態のままである。

5. 南房総市池ノ内での液状化－流動化現象と異常震域に関して

今回液状化－流動化現象がみられた（図10）南房総市池ノ内については、1923年関東地震時において、瀧川断層が現れたところ（図9；山崎，1925）である。ただし、この断層は幅500mといった非常に広い地溝状をなし、幅数m～十数mの平行な亀裂を伴い階段のように中心に向かって低くなっている。また、一部には地波のような波状変形も伴っている。このような状況から表層部ではいわば地層破壊が生じているものと思われる。約90年もたったものの、過去に破壊された地層が今回の地震で液状化－流動化し、噴砂・噴水および地波が発生したものと思われる。なお、房総半島ではいすみ市以南では震度4以下であるものの、1923年に地震断層として現れた延命寺断層に沿う館山市から南房総市の千倉の低地部には带状に震度5弱が現れ異常震動域をなしている。ここはちょうど楡井（1981）の活地塊の境界部に位置する。

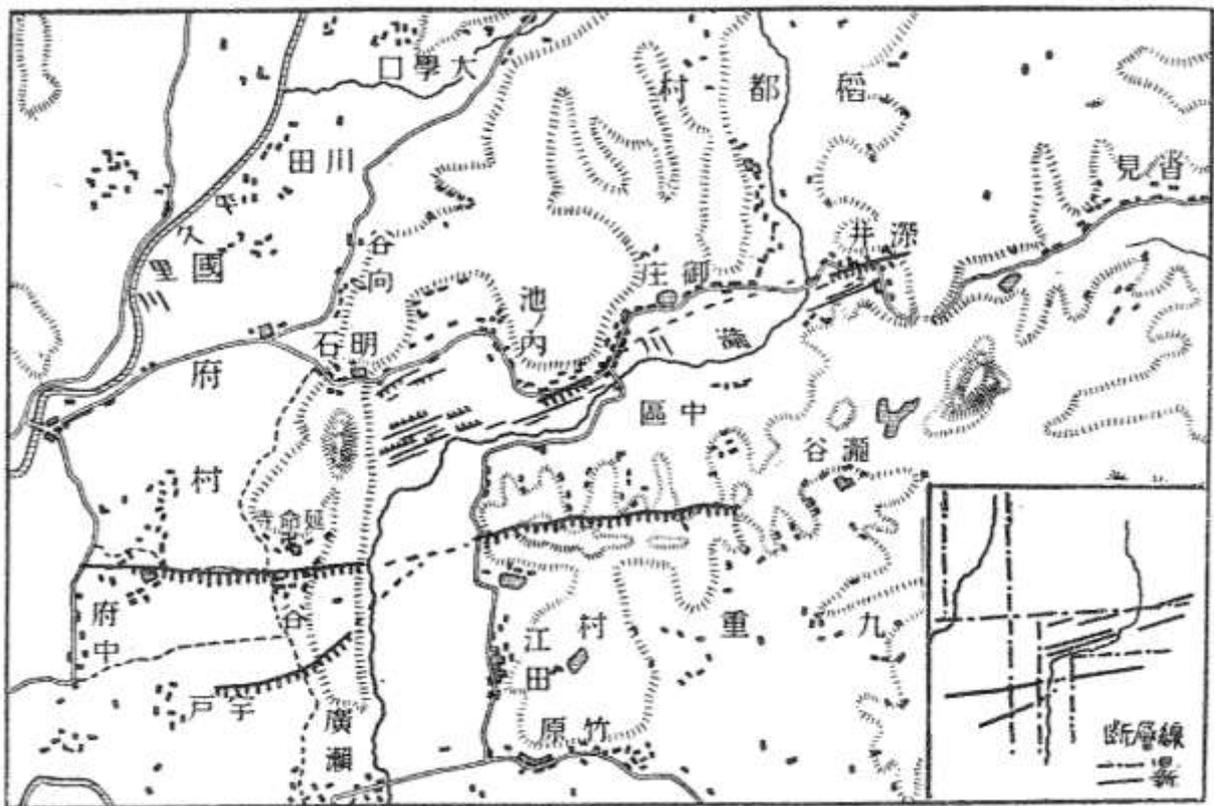


図9 1923年関東地震時に房総半島南部に現れた地震断層（山崎，1925）

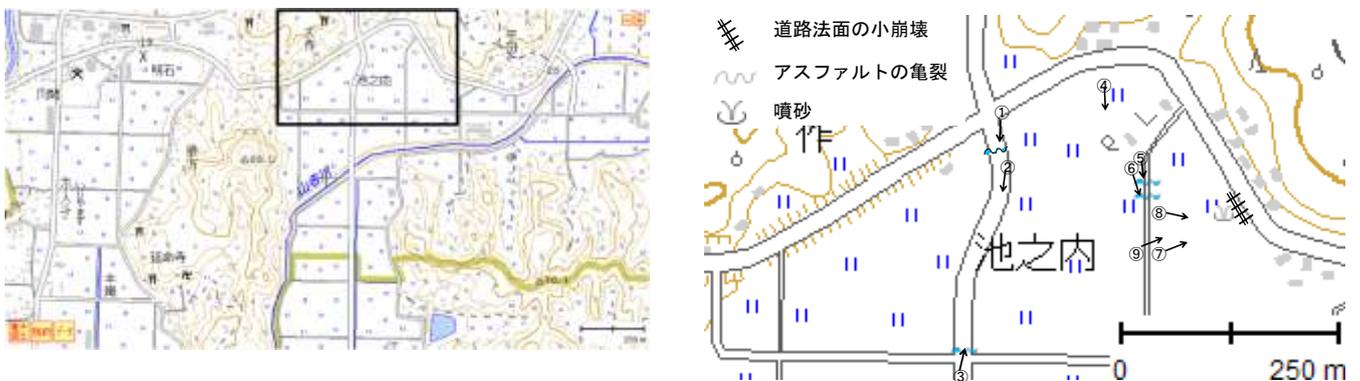


図10 2011年東北地方太平洋沖地震時に南房総市池ノ内にみられた液状化－流動化現象の分布（千葉県環境研究センター，2011b）

6. 埋立地の護岸の被害に関して

1923年関東大震災の際の横浜港の波止場では、護岸が海側へ移動しこの内側が陥没したり、突堤の護岸が海側へ傾動したりした(物部, 1926)。1995年阪神-淡路大震災では神戸付近のほとんどの埋立地において護岸が海側へ移動しこの内側が陥没し噴砂が出ており、液状化-流動化現象にともなう地すべりの結果と考えられる(千葉県地質環境研究室, 2003; 香川ほか, 1995など)。なお、液状化-流動化に伴う地すべりによる側方移動に関しては、1964年新潟地震や1983年日本海中部地震の際に広範囲にみられ、この側方移動が被害を拡大させている(Kawakami & Asada, 1966; Seed, 1968; 藤田, 1983)。埋立地の護岸は、これを境に埋立地側の地表と水域側の水底面との高低差があるので、護岸近傍で液状化-流動化現象が生ずると、何らかの対策が行なわれていない場合、これに伴う地滑りが発生する可能性が考えられる。ここでは、これまでの調査でみられた埋立護岸の被害状況をまとめてみた。今後の施設管理者における調査・対策の参考になれば幸いである。

浦安市内においては、北西方向に延びる見明川北部の舞浜2丁目の右岸の護岸に沿って30cmを超える沈下(抜け上がりより沈下量を推定)を伴う著しい液状化-流動化現象が起こっている。また、北西方向に延びる境川沿いでは左岸の護岸に沿う部分について、60cmを超える大きな沈下を伴う著しい液状化-流動化現象が美浜から入船にかけてみられる。右岸でも、60cmを超える沈下を伴う著しい現象が富岡から高洲にかけてみられる(図16)。このうち富岡2丁目では護岸の上部が内陸側に傾いており、液状化-流動化により下部が水路側へはらみ出し円弧状の地すべりが生じている可能性が考えられる。

船橋市日の出2丁目では、南北方向の護岸が西の海側へはらみ出し一部が倒れ、この内側に地滑りを生じ構造物に被害が起こっている。船橋市二俣新町南端の北東方向に延びる護岸では一部が海側へ崩落している。この沖合いの船橋市潮見町のふなばし三番瀬海浜公園の西北西方向に延びる護岸の一部は、南南西方向にはらみ出している。いずれも被害のあったところでは、噴砂も出ていることから液状化-流動化に伴う地滑りによる被害と考えられる。

以上のほかに、北東方向に延びる護岸の一部ではやや規模の大きな被害がみられている。浦安市日の出～明海にかけての北東方向に延びる護岸においては、護岸の内側50m程度の幅にわたって護岸に平行な開口亀裂が数列もみられ、また数十cmの段差をとめない、沈下している。また、千葉市美浜区打瀬の花見川右岸沿いでは、北東方向に延びる護岸の上部が水路側へ倒れ、この内側は一部50m程度の幅にわたって護岸に平行な幅数十cmの開口亀裂が数列みられ、また数十cmの段差をとめない、沈下している。ここでも噴砂を伴っていることから、液状化-流動化に伴う地滑りによるものと考えられる。一方、図12～図15に示すように、太平洋沖地震では、トランスバース成分である北西-南東方向の大きなゆれがあったことから、このゆれも大規模な被害の一因になっている可能性がある。

さて、図11は、東方沖地震の際に千葉市美浜区の幕張の浜において带状にみられた液状化-流動化現象の状況と、その調査結果の地質断面図である。埋立地を作る際の護岸が砂の中に埋まっており、護岸の内側約50mの幅で噴砂を中心とした液状化-流動化現象がみられた。調査の結果、護岸はコンクリート製で、その下には基礎としてシートパイルが打たれていた。このため、これが地下ダムの役割を果たすことになってしまい、護岸内側では地表に降った雨が浸み込むものの、護岸の外への流動が遅くなり、地下水位が高い状態で維持される格好になっていることが明らかとなった。サンドポンプ工法で埋立られた地層は護岸近傍では砂層を中心としているので、このように透水層を遮断するような構造物が形成されると、地下水の流動障害を起こすことになり、構造物の上流側では地下水位が高くなり、液状化-流動化を起こしやすい一因になってしまう。液状化対策として薬液注入を行ったり、地下壁を作るのも同様で、地下に構造物を作る際には、地下水流動を何らかの方法で確保するか、内側について、ドレーン工法などの対策を行なうことが重要と考えられる。

なお、護岸の一部に孔をあけ内側の地下水位を下げれば地下水位が広域的に低下するので液状化しにくくなる。しかし、第3報で述べたように、東京湾岸埋立地ではサンドポンプの吹き出し口から遠いところでは泥層が厚く堆積しており、これら泥層はあまり圧密を受けていないので、地下水位が低下するとこの泥層内の含水量が染み出し収縮する可能性が高く不等沈下をおこしやすい。どのような対策がよいのかは、事前に地質環境調査を行い、周囲の地質状況も考慮し、その場の地質環境に見合った対策が必要となる。

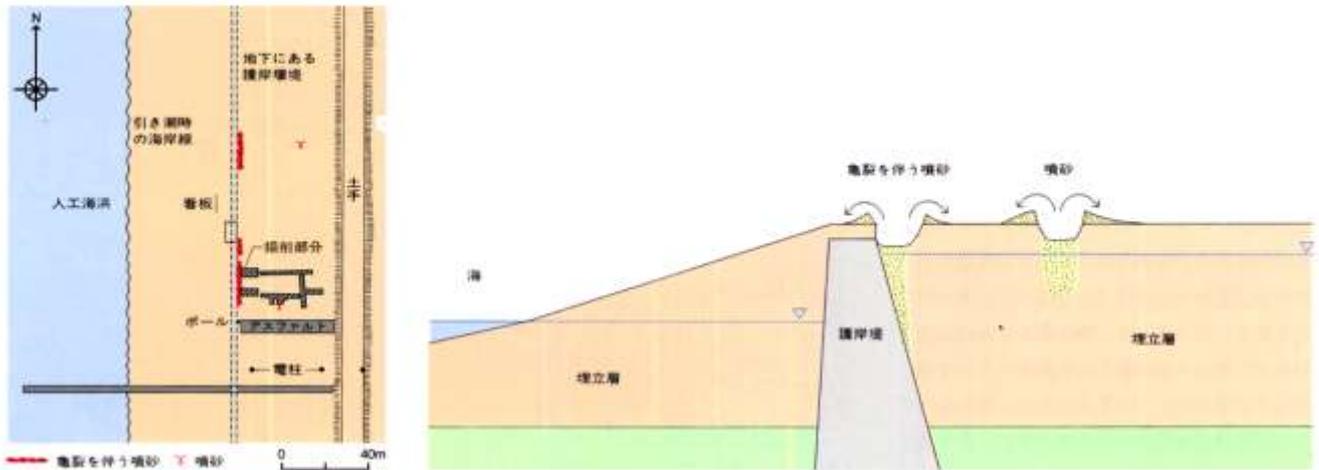


図 11 東方沖地震時の幕張の浜における液状化－流動化現象の分布（左）と被害部分での地質断面（右）（千葉県地質環境研究室，2003）

7. 液状化－流動化現象の近傍での太平洋沖地震の本震と余震の代表的な地震波形

ここでは、今回液状化－流動化の発生した近傍の地震観測点での代表的な本震と余震の地震波形についてまとめて紹介する。なお、観測点位置は図 5 を参照されたい。

扱った観測点は、防災科学技術研究所観測点の CHB008 浦安（浦安市猫実の東小学校敷地内）・CHB024 稲毛（本センター稲毛地区敷地内）、防災危機管理課が管理し本センターがデータ化している震度観測点のうち香取市佐原口（香取市役所敷地内）・旭市萩園（旧飯岡町役場敷地内）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開発の View Wave および防災科学技術研究所の SMDA2 を利用した。

各観測点の波形記録を図 12～図 15 に示す。なお、各記録の最初には平面方向の動き（変位）の時系列変化を、次にラディアル成分（地震波の伝播方向）・トランスバース成分（地震波の伝播方向と直交方向）・鉛直成分の波形を加速度、速度、変位の順に示した。いずれの観測点も本震の際は、トランスバース成分である北西－南東方向の強いゆれがみられている。

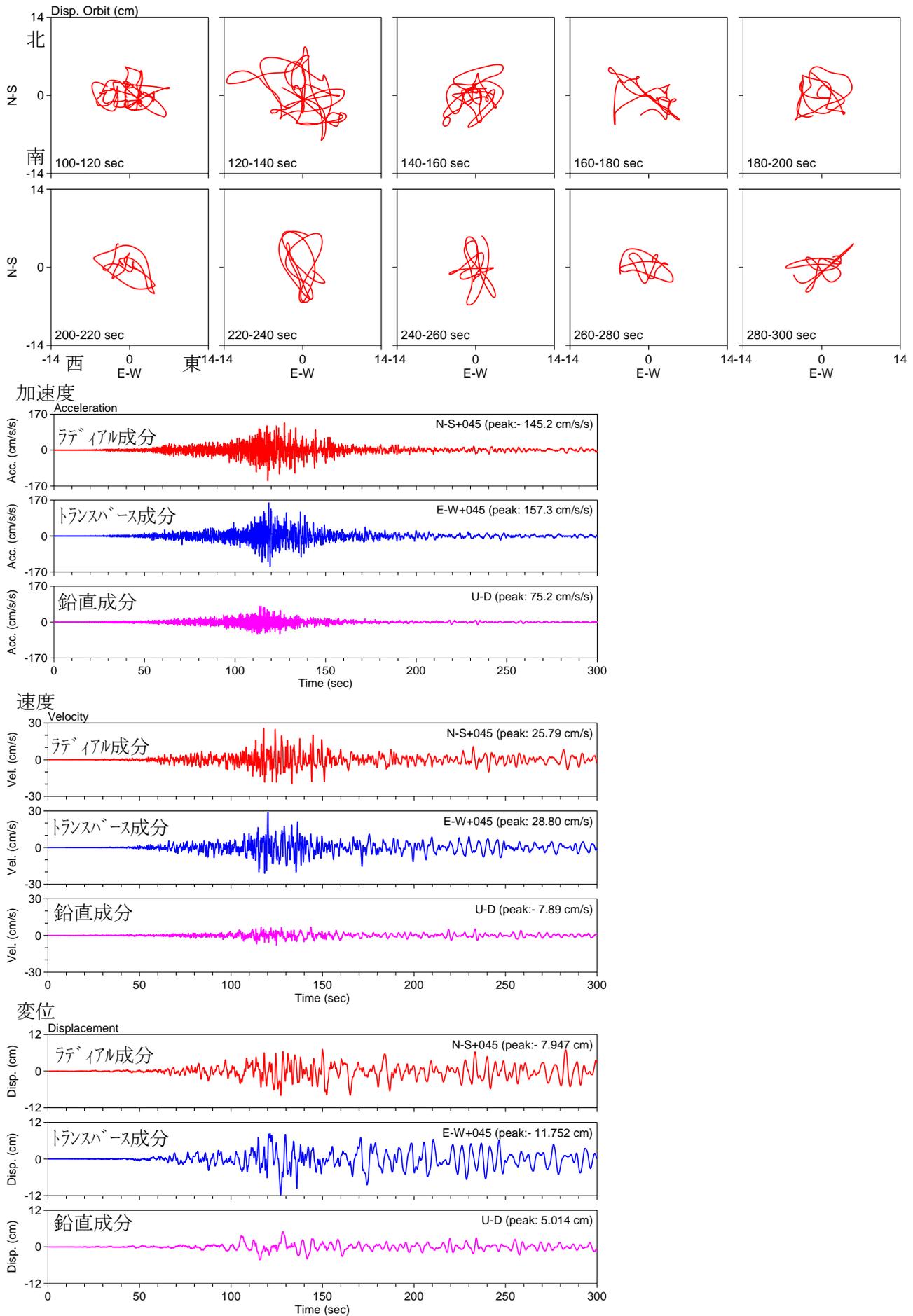
浦安では、本震～最大余震の際には近傍にて液状化－流動化現象が連続してみられた。本震時は計測震度 5.2（震度 5 強）でトランスバース成分の速度が最大約 29cm/秒と十分大きいものの、余震時は計測震度 4.6（震度 5 弱）、トランスバース成分の速度は約 15.5cm/秒と小さい（図 12）。

稲毛では、本震～最大余震の際には液状化－流動化が連続して起こっており、本震時は計測震度 5.3（震度 5 強）、最大速度はトランスバース成分の約 32cm/秒ととても大きいものの、余震時は計測震度 4.4（震度 4）と小さい。なお、最大余震の波形記録はまだ公開されていないので、最大速度は現段階では不明である（図 13）。

佐原口では、著しい液状化－流動化現象が発生した。本震時は計測震度 5.4（震度 5 強）で、最大速度はトランスバース成分の約 47cm/秒とかなり大きい。最大余震時には計測震度 5.3（震度 5 強）、最大速度はラディアル成分の約 33cm/秒と大きくゆれた（図 14）。

旭市萩園では、著しい液状化－流動化現象が発生した。本震時には計測震度 5.0（震度 5 強）で、最大速度はラディアル成分の 21cm/秒とそれほど強いゆれではなかったものの、最大余震時には計測震度 5.2（震度 5 強）、最大速度はラディアル成分の約 28cm/秒とこちらのほうが大きい（図 15）。

図 12 CHB008 浦安 本震 計測震度：5.2 記録開始時刻：14 時 47 分 00 秒



CHB008 浦安 余震 計測震度 4.6 記録開始時刻 : 15 時 13 分 16 秒

