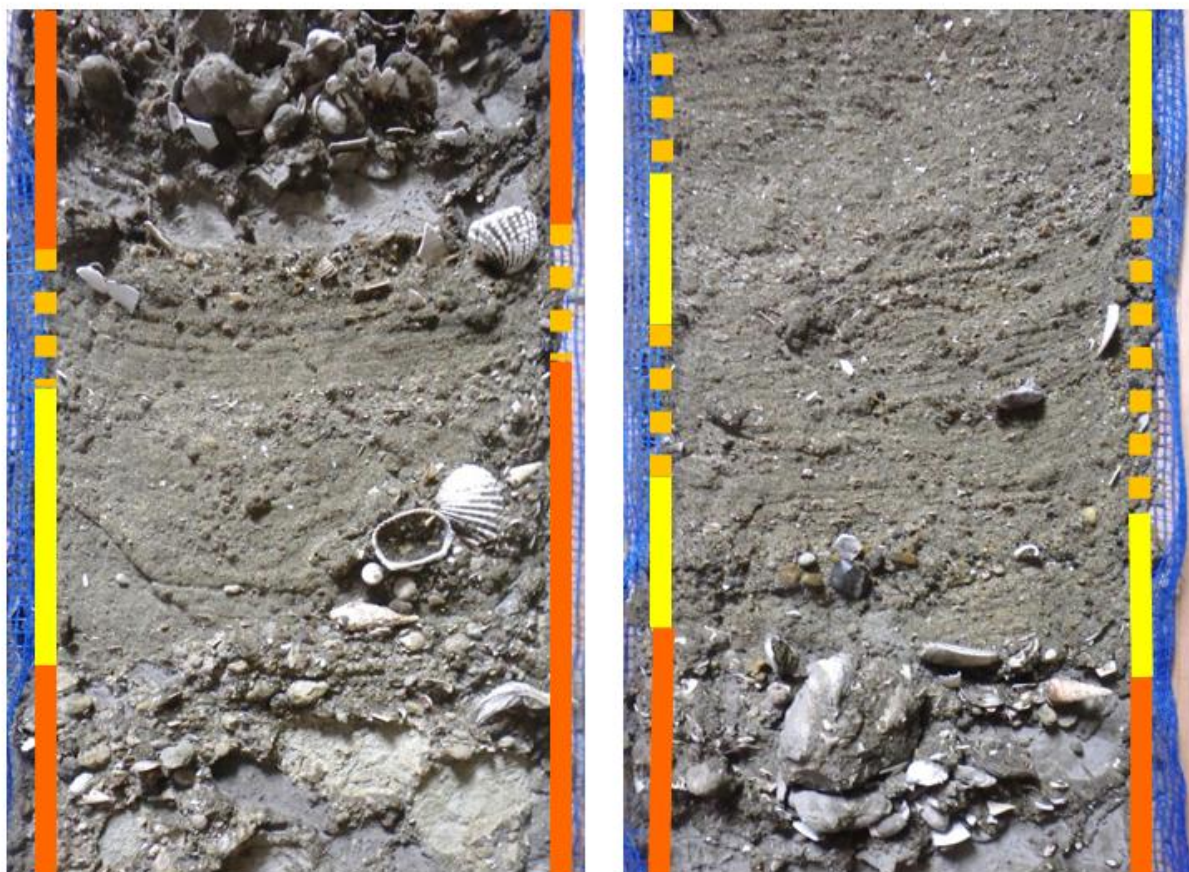


液状化－流動化現象について
2011年東北地方太平洋沖地震での被害状況と
分かってきたメカニズムⅡ



- 液状化－流動化部分(ラミナ消失部分)
- 液状化部分(ラミナぼやけ部分)
- 非液状化－流動化部分

目次

1. 地層断面調査結果	1
2. 地中地震・間隙水圧観測の経過報告	6

* 表紙写真の説明：地層断面調査の際に採取された、沈下部分の地下においてみられた液状化－流動化部分の地層のはぎ取り面

作成担当：千葉県環境研究センター地質環境研究室 風岡 修
千葉県環境研究センター地質環境研究室 荻津 達

発行：千葉県環境研究センター
市原市岩崎西 1－8－8

本書の内容については下記までお問い合わせ下さい。
千葉県環境研究センター地質環境研究室 風岡 修・荻津 達
住所：〒261-0005 千葉県美浜区稲毛海岸 3-5-1
電話：043-243-0261 ファックス：043-243-0263

1. 地層断面調査結果

(1) 地層断面調査の経緯とその方法

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震では、主に九十九里平野北部、利根川低地、東京湾岸埋立地北部で、人工地層（埋立や盛土といった人工的に作られた地層）を中心に液状化－流動化現象が発生しました。東京湾岸埋立地北部では全域が一様に液状化－流動化したわけではなく、幅 50m 程度・長さ 100m 程度の局所的な部分に集中して発生し、数十 cm もの沈下を伴いました（図 1）。このような沈下部分が埋立地内に斑状に発生したのは、過去の地震でもほとんど例がありません。このため、その予測や対策には、まず実際の地質環境（地下の状態）を明らかにし、液状化－流動化現象のメカニズムを明らかにしていく必要があります。そこで、千葉市美浜区磯辺地区内の沈下の程度が局所的に大きく変化する部分において、25 年 12 月に調査を行った結果の概要を示します。

今回の調査は、沈下の程度が水平方向に変化している部分に、特殊な地層採取サンプラーを大型重機で圧入し（写真 1）、3～5m 間隔に（写真 2）幅・厚み 20cm 程度、深さ 4.5～7.5m 程度の地層を、液状化－流動化部分も含めて乱さずそっくり採取し、人工地層を中心とした表層部の詳細な地質環境（地下の状況）の側方変化（水平方向への変化）を明らかにしました。

地質環境の側方変化については、採取した試料を観察し、液状化－流動化部分と非液状化－流動化部分を区別することにより（写真 3）、これを把握していきました。

(2) 調査地の埋立層の様子と液状化－流動化部分

調査によって明らかになった地層の連続性や側方への変化の状況を図 2 及び図 3 に示します。地下水位は深度約 2m、人工地層の厚さは 8m 以上でした。

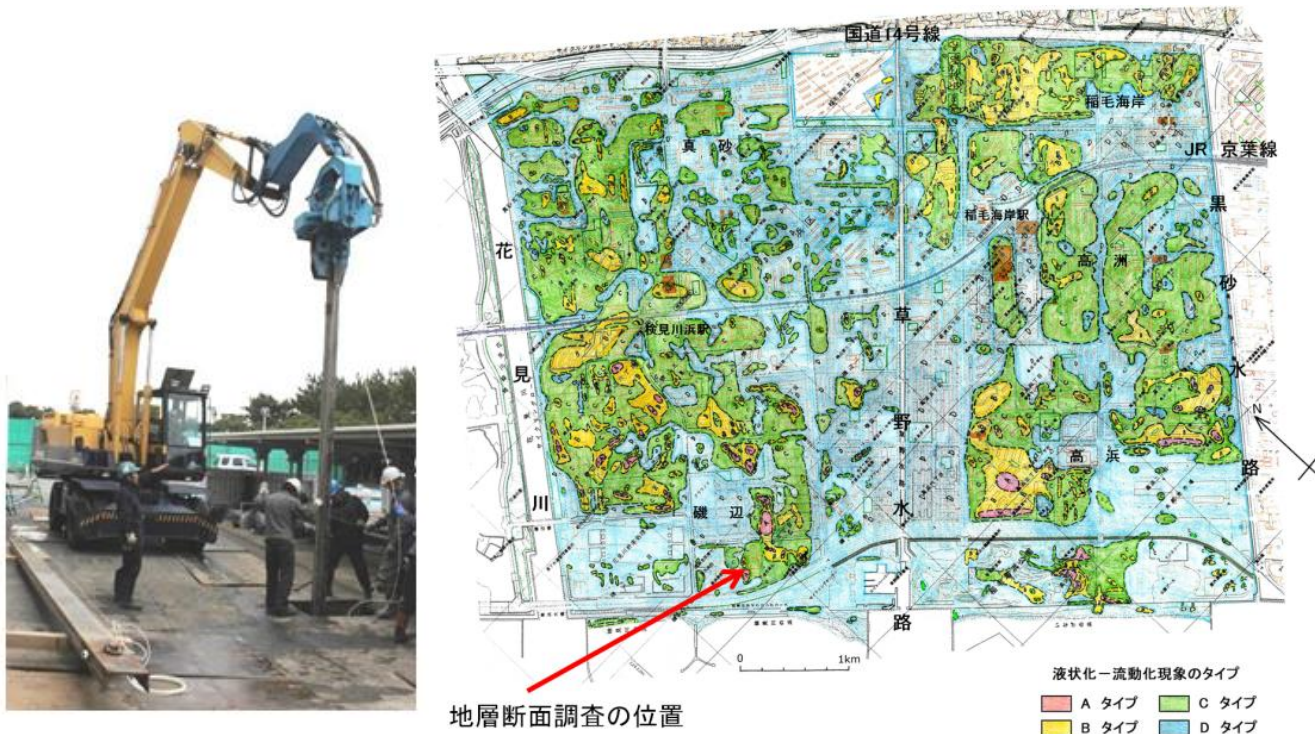




写真2 学校内の被害と地層採取地点（番号は地層採取地点で図2・図3の番号と同じ）

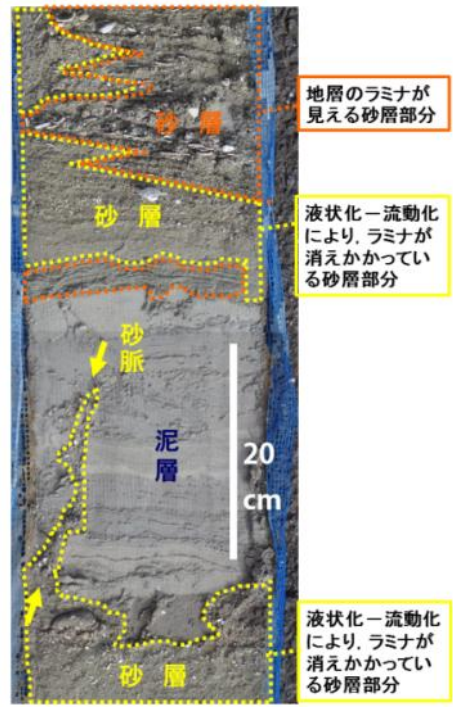


写真3 地層採取試料の例（図3の8番）

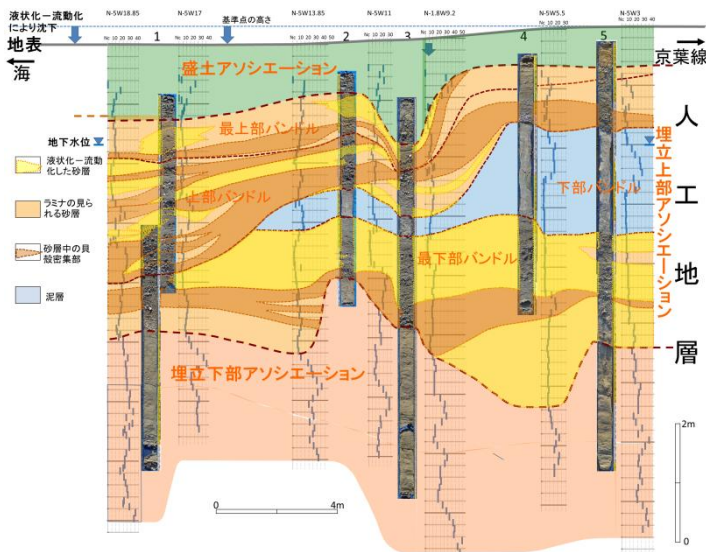


図2 調査地の地層断面
(数字は写真2の地層採取位置番号)

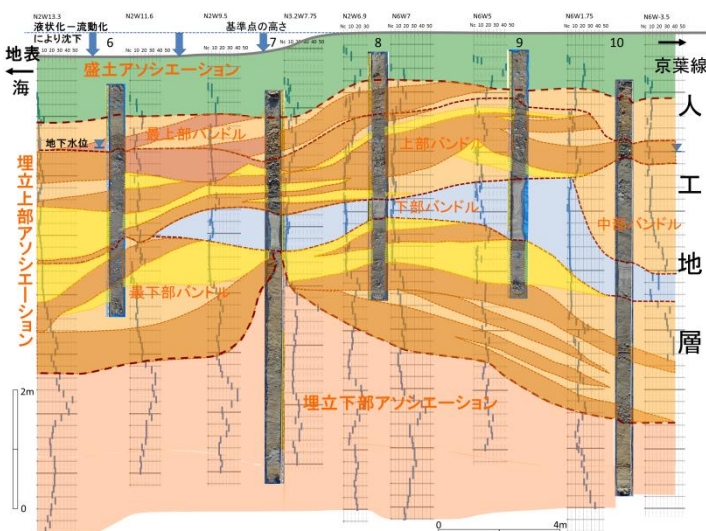


図3 調査地の地層断面
(数字の写真2の地層採取位置番号)

表 1 人工地層の層序表 各人工地層の特徴と液状化－流動化部分の特徴

アソシエーション*1	バンドル*2	地層の特徴	液状化－流動化部分の状況
盛土アソシエーション		厚さ1.5～2.2mで、主にシルト礫や硬質礫を含む砂混じりシルト層～シルト質細粒砂層から構成される。ダンパーなどで搬入された土砂をブルドーザーなどで移動・堆積させることで形成されたと考えられる。	全体に泥が多く混じるため、透水性が悪く液状化－流動化部分は見られない。下位の埋立上部アソシエーションからと思われる黄褐色や灰色の噴砂脈が図2の3及び4に、亀裂は図3の8付近で見られる。
埋立上部アソシエーション	最上部バンドル	厚さ0.2～0.7mで、黄褐色の細粒砂～中粒砂層を主とする。貝殻片密集層を挟む。	一部の砂層は、ラミナが消失ないしぼやけ液状化－流動化したものと考えられる。
	上部バンドル	厚さ0.4～2.0mで、ゆる詰まりの灰色の中粒砂層中に中礫サイズのシルト礫を含む貝殻片密集層を頻りに挟む。	ゆる詰まりの砂層の多くは、ラミナが消失ないしぼやけ液状化－流動化したものと考えられる。
	中部バンドル	厚さ0～1.8mで、ラミナがよく見え、比較的しめ固まった灰色の貝殻片を含む中粒砂層を主とする。	多くの砂層は、よく締まりラミナがみられるものの、一部にラミナがぼやけ液状化が生じたものと考えられる。
	下部バンドル	厚さ0～1.8mで、極軟弱な灰色のシルト層からなる。	本層堆積時に流動変形した痕跡がみられる。地震時には、亀裂が生じ砂脈が形成された痕跡がみられる。
	最下部バンドル	厚さ0.8～2.9mで、貝殻片が混じる灰色の中粒砂層を主体とし、貝殻片密集層を挟む。関東ローム層の細礫を含む。	砂層の多くには、ラミナが消失ないしぼやけた部分が見られ、液状化－流動化したものと考えられる。
埋立下部アソシエーション		厚さ5m以上で、黄褐色の細粒砂～中粒砂層からなり、泥を含み、粒径がよく揃そろい、ラミナがよく見え、よく締め固まっている。	一部に埋立上部アソシエーションが堆積する前に液状化－流動化した部分が見られる。これは、液状化－流動化した部分が、埋立上部アソシエーションが堆積する際に削り取られた痕跡があることから判断される。

人工地層は地表付近の重機によって盛土されて出来た盛土アソシエーション*1と、この下位のサンドポンプ工法*3により2期に分けて埋立てられて出来た埋立上部アソシエーション・埋立下部アソシエーションから構成されます。今回の地震は揺れが強く長かったため、深部までの液状化－流動化が予想されましたが、実際には人工地層全体に見られるのではなく、埋立上部アソシエーションに集中して見られました。

埋立層は、主に砂層・貝殻層・泥層から構成され、地層は鉛直方向や水平方向へ規則的な変化（粒径が大きい部分から次第に小さい部分へと変化）が見られます。

このうち、液状化－流動化は主に埋立上部アソシエーションの砂層の一部で見られています。

写真3に示すように、非液状化－流動化部分は、地層堆積時に形成されるラミナ（地層断面中に見られる筋模様）*4が明瞭に見えるのに対し、液状化－流動化部分は、ラミナ*3が消えたりぼやけたりしています。

また、液状化－流動化部分の多くは、地層がゆる詰まり状態となっており、再液状化しやすいことが推定されます。

各人工地層の特徴と液状化－流動化部分は表1のとおりです。

（3）液状化－流動化と沈下に関するメカニズム

今回の調査で明らかになってきた液状化－流動化やこれに伴う沈下に関するメカニズムについて以下に示します。

（ア）液状化－流動化のメカニズム：サンドポンプ工法による埋立層の中でも、今回の調査で確認された、「泥層の下位に接する砂層中に広く液状化－流動化が見られる」という現象は、千葉県東方沖地震時においても、別の地点で見られました。これは、泥層は軟らかく、地震時には大きく振動するのに対し、砂層は比較的硬く、比較的振動しにくいいため、泥層と砂層の境界部に歪みが生じ易いこと、泥層は水を透しにくく、泥層に接する砂層内の水圧が高まりやすいこと、この2つの影響により、液状化－流動化が発生したものと考えられます。

（イ）斑状の沈下のメカニズム：地盤沈下部分の分布は、埋立上部層最下部の液状化－流動化の分布とは異なり、埋立上部層上部（深度2-4m）の液状化－流動化の分布とはほぼ一致します。このこと

から、埋立上部層上部の砂層の一部が液状化し、引き続く流動化によって、この砂層が地表に噴砂となって噴出したため、地表が沈下したものと推定されます。

- (ウ) **液状化予防のヒント**：液状化－流動化が見られる埋立上部層の中では、貝殻片密集層部分は液状化－流動化現象はほとんど見られません。これは、この層は隙間が多く、透水性が極めて良いことから、地震時に高まる水圧が周囲へ発散しやすいためと推定され、今後の液状化－流動化の予測や対策を考える上で重要な点といえます。
- (エ) **厚い泥層による沈下被害抑制の可能性**：埋立上部層下部の厚い泥層の下位の砂層では広く液状化しているものの、泥層はほとんど変形しておらず、地表では地盤沈下もわずかです。この泥層は粒子同士を結合させる粘土鉱物を含んでいるため液状化していません。この泥層は水を通しにくく、直下の液状化した部分が流動できず、そこにとどまったため、地盤沈下があまり起こらず、軽微な被害で済んだ可能性があります。

(4) 調査地における地質環境特性と液状化－流動化の予防に関する考察

- (ア) 埋立層内には、収縮しやすい軟弱な泥層が部分的に厚く挟まれており、地下水位を低下させる際には、地盤の沈下に十分注意する必要があります。
- (イ) 透水性が極めて良い貝殻層が複数挟まれているので、不透水性の構造物等でこの層を遮断すると、地下水の流れの上流側では地下水位の上昇をまねき液状化しやすくなることが推定されます。
- (ウ) 砂層部分に液状化－流動化が見られるので、この部分での地震時の水圧の上昇を消散させる方法を考えれば、液状化を予防できると推測されます。
- (エ) 今回の調査地の地質環境条件では、液状化－流動化を防止するには、平常時の地下水面をあまり変化させず、透水層の構造を遮断することがなく、地震時に砂層内で上昇する水圧を消散させる方法（例えばドレーン工法などはこれにあたる）が適当と考えられます。
- (オ) 地盤凝固剤として薬液注入などの液体を注入する際、砂層中に透水性の良い貝殻層が挟まれている場合、液状化しにくい透水性の非常に高い貝殻層へ浸透していきやすく、液状化しやすい砂層へは浸透しにくくなり、有効な液状化防止対策とはなりにくい可能性があります。このため、対策を行う前に、オールコアボーリングにより調査地の地層構成や液状化－流動化部分を明らかにしたうえで、対策方法や工事方法を検討し、対策工事を行うことが有効な対策となりうると考えられます。

*1・*2：アソシエーションとバンドルは IUGS-GEM（国際地質科学連合環境管理委員会）で提案されている人工地層のオーダー（生物分類の属や科などにあたるもの。複数枚の単層（一枚の地層）が集まり共通する特徴を持つ集合体をバンドル、バンドルが集まりある特徴を有する集合体をアソシエーションと呼ぶ（Nirei ほか、2012、Episod、35 巻、P.333-336））を表す用語。

*3：水底の地層を水と共に吸い取り、パイプを通して埋め立てたい場所に圧送し、土砂を沈積させて埋め立てを行う工法。1900 年代初期より、大規模な埋め立てを行う際、世界中で一般的に行われている埋め立て方法。パイプからの土砂の吐き出し部分では、水流の勢いが強いため、その落ち口では地層は浸食され、流速が衰えるにつれ、礫や貝殻などの大きな重い粒子が沈積し、その先では砂が沈積する。泥は沈殿速度が遅いので、遠くまで運ばれ沈積することとなる。

*4：地層に見られる筋模様（成層構造）の一種。単層（一枚の地層）の内部で粒径の異なる粒子が植物の葉程度のごく薄い層をなして重なり、断面において筋状に配列する構造。（地層粒子が水底に沈積する際、その粒径や水流の速さなどによって様々な形態の筋模様ができる。この模様をラミナという。）

（環境研究センター26年3月18日公表「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 ー第6報平成25年度地層断面調査結果速報」より抜粋。参考図書：25年3月環境研究センター発行「液状化-流動化現象について 2011年東北地方太平洋沖地震での被害状況と分かってきたメカニズム」。）

2. 地中地震・間隙水圧観測の経過報告

(1) はじめに

千葉県環境研究センター地質環境研究室では、地質構造による地震動の変化や液状化―流動化のメカニズム解明のため、県内に地震計や間隙水圧計を設置し、常時観測を行っています。

平成27年5月30日20時24分(JST)頃、小笠原諸島西方を震源とする地震が発生しました。震源の深さは682 km、マグニチュードは8.1(気象庁発表)で、日本周辺で発生した地震としては平成23年3月11日に発生した東北太平洋沖地震以来最大規模でした。

この地震において、千葉市美浜区の埋立地内に設置した3箇所の地中地震計及び間隙水圧計の観測から、同じ埋立地内でも液状化―流動化が集中して発生した沖積層が厚い観測点における地震動の増幅や間隙水圧の上昇が、沖積層の薄い観測点におけるそれよりも大きい傾向が確認できたので報告します。

(2) 観測地点概要

報告する観測点は高洲観測点、真砂観測点及び検見川観測点で、場所は図4のとおりです。各観測点にはそれぞれ埋立層、沖積層及び更新統に地中型速度計または地中型加速度計を設置し、高洲観測点及び真砂観測点においては埋立層及び沖積層中の砂層に間隙水圧計を設置し観測を行っています。装置の概略は図2のとおりです。

(3) 観測結果

各深度の地震動加速度波形の東西方向成分及び間隙水圧変化を図5に併せて示します。更新統に設置した地震計の東西方向加速度波形の最大振幅は高洲観測点で9.9gal、真砂観測点で11gal、検見川観測点で9.1galですが、それぞれの設置深度が異なるにもかかわらず同程度でした。一方、埋立層に設置した地震計での東西方向加速度波形の最大振幅は高洲観測点で30gal、真砂観測点で18gal、検見川観測点で17galで、高洲観測点で最も高くなりました。高洲観測点では加速度の最大振幅は約3倍になっているにもかかわらず、真砂、検見川観測点では2倍弱でした。また、その他の方向成分についても同様の傾向が見られました。

埋立層に設置した間隙水圧計の波形は高洲、真砂両観測点で振幅の中心が急激に上昇する間隙水圧のベースライン上昇の変化がみられました。その変化量は高洲観測点の方が大きい事が確認されました。沖積層に設置した間隙水圧計の波形からは高洲、真砂両観測点共に明瞭なベースライン上昇変化は確認できませんでした。

(4) まとめ

- ・各観測点で浅部にいくにつれ地震動の最大振幅が大きくなる傾向が確認されました。
- ・各観測点の更新統における最大振幅に大きな違いは見られず、地震動の増幅はそれ以浅で起こっていると推定されます。
- ・地震動の増幅は沖積層の厚い高洲観測点でもっとも大きく、真砂観測点及び検見川観測点は同程度でした。
- ・ベースラインが上昇するタイプの間隙水圧変化が高洲観測点及び真砂観測点の埋立層で確認され、高洲観測点での変化が真砂観測点での変化よりも大きい事が確認されました。

観測地点

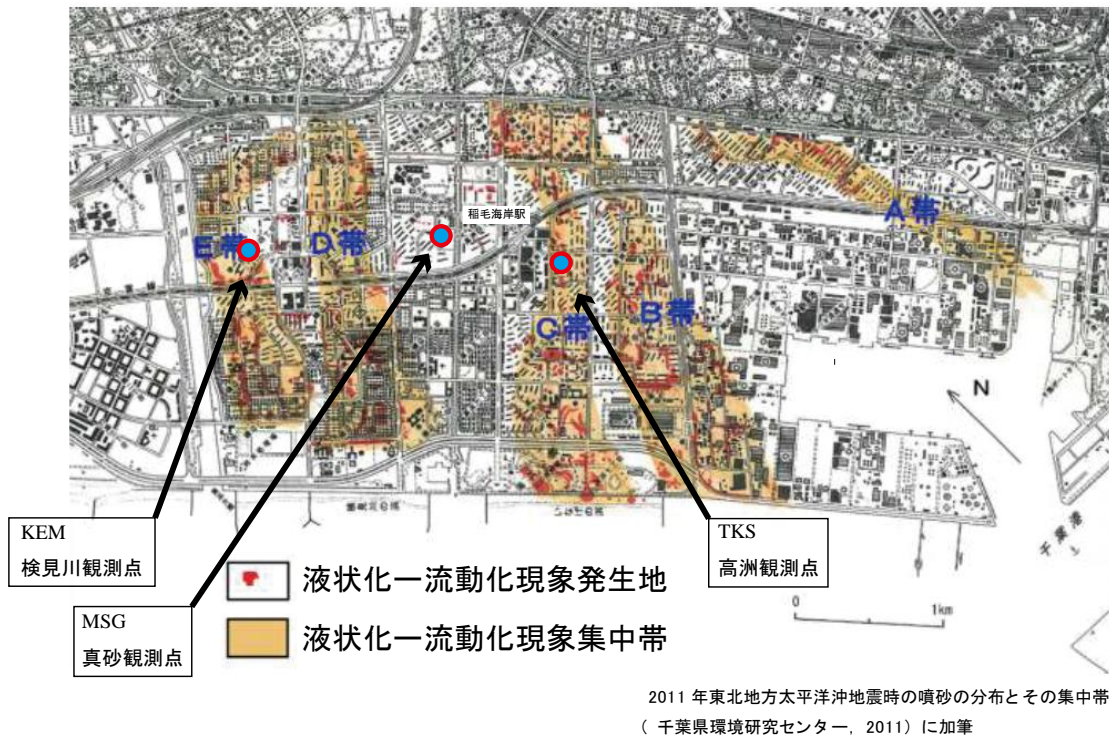


図4 東京湾岸地域東部の2011年東日本大震災による液状化-流動化現象の分布と地震・間隙水圧観測地点

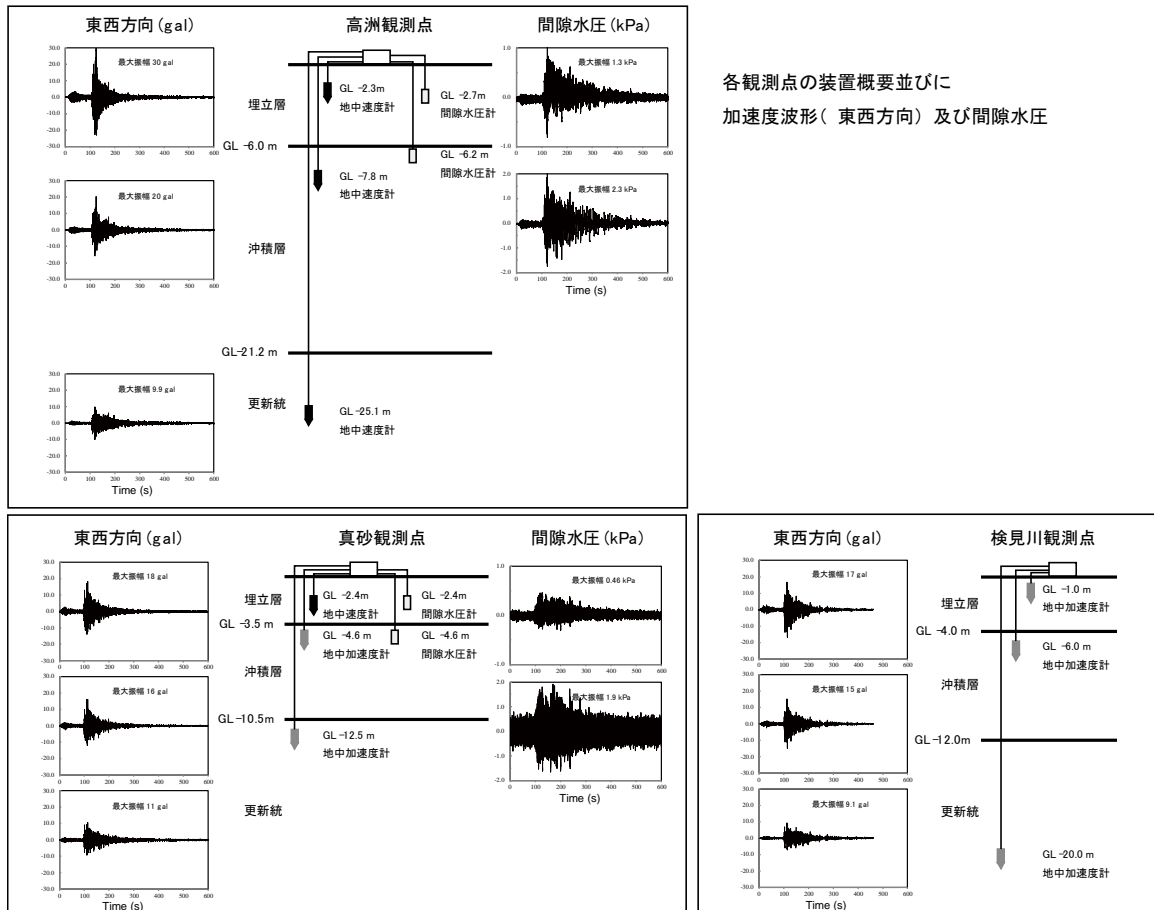


図5 2015年小笠原諸島西方沖地震時の地中地震・間隙水圧観測結果