

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



平成25年3月
千葉県環境研究センター

はじめに

2011年3月11日に東北地方では約千年ぶりといわれるマグニチュード9の東北地方太平洋沖地震(以下「太平洋沖地震」と略す)が occurred。2004年スマトラ沖地震に匹敵する巨大地震で、この揺れと大津波により甚大な災害となりました。房総半島でも、太平洋岸に沿い最大7mを超える津波があり多くの方が被災されています。また北部を中心に広い地域で気象庁震度階(以下「震度」)「5強～6弱」の強い揺れとなり屋根瓦の被害が多数あっただけでなく、埋立地を中心に人工地層(埋立層や盛土層など人工的に作った地層)が液状化―流動化し、戸建て住宅や電柱・塀などの浅層基礎構造物の沈み込みやガス・上下水道などのライフラインに多くの被害がありました。環境研究センター(以下「当センター」)では25年前の1987年千葉県東方沖地震(以下「東方沖地震」)の際には、人工地層分布域を中心に液状化とこれに引き続く流動化現象が発生したことを、地質環境研究室における調査で解明し、その結果の発表、産学官の共同研究による液状化対策の新工法の開発、対策の提案などを行なってきました。

ここでは、太平洋沖地震での房総半島全域の液状化―流動化現象の概要について述べるとともに、東方沖地震後に明らかになってきたメカニズム解明例や被害軽減に向けた取組について紹介します。

なお、本書の基となった調査研究報告については、以下のHPでご覧いただけます。

<http://www.pref.chiba.lg.jp/wit/chishitsu/ekijoukahoukoku/index.html>

液状化―流動化の被害写真

(典型的な写真を下記に掲載しました。本文中にも多数掲載しています。)



表紙の写真

千葉市美浜区稲毛海浜公園
3月12日16時ごろの様子。
砂混じりの噴水が続き、しばらく
沈下が進んだ。



地表の変形の例

海浜幕張駅周辺での地表の
変形の様子(3月14日)。



電柱の沈み込みの例

千葉市美浜区新港での電
柱の沈み込み(3月14日)。

目次

1. 2011年3月11日稲毛海浜公園14時46分	1
2. 太平洋沖地震の概要	3
3. 液状化－流動化現象とは	4
4. 地震の揺れと、液状化－流動化現象の分布	5
4. 1 房総半島での震度分布と液状化－流動化現象の分布	5
4. 2 東方沖地震の際の液状化－流動化現象の分布との比較	6
5. 太平洋沖地震による液状化－流動化現象と被害状況	7
5. 1 房総半島全域に共通する事項	7
5. 2 東京湾岸埋立地での被害の特徴	8
5. 2. 1 浦安地区の液状化－流動化被害の詳細調査結果	8
5. 2. 2 千葉市美浜区での液状化－流動化現象とその被害	11
5. 2. 3 東京湾岸埋立地の特徴	13
5. 3 利根川下流低地での特徴	17
5. 4 九十九里平野での特徴	17
5. 5 液状化－流動化しやすい場所しにくい場所	20
5. 5. 1 斑状分布の一因（図7の赤色部分）	20
5. 5. 2 帯状分布（図7のオレンジ色部分）の原因の推定	20
6. 房総半島周辺における液状化－流動化現象のまとめ	22
7. 液状化の防ぎ方	23
8. 今後の復旧・復興と大地の持続的利用に向けて	24
参考 液状化－流動化現象の基本メカニズムの解明例等	25
1. 液状化－流動化の概念を確立した香取市石納でのトレンチ調査	25
2. 液状化対策としてのドレーン工法	26
3. 液状化－流動化現象を観測した地盤沈下観測井	26
4. 埋立地護岸沿いに発生した液状化－流動化現象について	27
参考文献	28

1. 2011年3月11日稲毛海浜公園14時46分

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の時には皆さんはどうされていましたか？

当センター地質環境研究室職員は、千葉市美浜区の埋立地にある稲毛海浜公園で調査中でした。稲毛海浜公園内では、14時46分過ぎより揺れ始め、揺れは次第に強くなっていき、地面の左右で揺れ方に違いが起ころ始め、続いて地面の一部で海のように波打ち始め(地波現象)、亀裂を生じました。亀裂からは約5秒おきに砂混じりの地下水が噴き出したり、噴き出た水が亀裂に吸い込まれたりを繰り返しました。その後、連続的に砂混じりの地下水が噴出し、その勢いは急に増し、芝生の一部を持ち上げ、ついには芝生の一部がちぎれ、大量に地下水(毎秒100リットル程度)が噴出し、じわじわと地面は沈んでいきました。この噴水や沈下は30分ほど続き、あたり一面は深さ20~30cm程度の広く浅い池のようになっていきました。噴水も治まりかけたときに、再び強い揺れ(最大余震)が起こり、再び地面は地波現象を起こし、海の波のように波打ち始めました。波長は約10m程度と最初の本震の時と同じぐらいでしたが、振幅は本震では20cm程度だったのですが、最大余震では40cm程度と大きな波となり、足元もふわふわとしてきて、ここで立っていたら沈んでしまう恐れも出てきたので、水たまりになっていたところからはひとまず離れ、隣接した液状化一流動化していない木が植わっている茂みに避難し、地波現象が治まるのを待ちました。地波現象は数分間続き、噴水や沈下も再びはじまりました。16時前には、噴水も治まりました。この間の現象の一部を写真に収めたものが、以下の写真です。なお、この公園では1987年12月に起こった東方沖地震の際



写真1
本震前の14時40分頃の稲毛海浜公園の芝生広場。



写真2
本震中14時51分30秒すぎ頃に約5秒周期の最大波高数十cmの波打ちが発生し、噴砂・噴水が始まる。砂まじりの黒い噴水は高さ50cm程度。

にも、噴砂が発生しています。今回の地震では、東方沖地震時に発生した場所を含めて、この周囲のより広範囲に噴砂・噴水が発生しました。



写真3 本震中14時50分頃 東方沖地震の際 噴砂のあったところで噴砂・噴水が14時49分30秒過ぎ頃から始まっていた。14時54分頃までは、約5秒周期で砂まじりの噴水が出たり、水が吸い込まれたりを繰り返した。

写真4 本震後14時54分頃 噴水量が増え始める。



写真5 本震後14時55分頃 連続的に噴水が出始め、芝生が膨らみ、一部がはち切れ、大量の砂まじりの噴水が始まった。

写真6 本震後14時56分頃 大量の砂まじりの噴水が続き、じわじわと沈下がはじまった。



写真7 最大余震前15時10分頃 芝生公園の広い部分が水没した。

写真8 翌日の3月12日16時ごろ、さらに砂まじりの噴水が続き、沈下も進んだ。

2. 太平洋沖地震の概要

東日本に大きな被害を起こした、今回の地震はどこでおこり、日本列島ではどのような揺れの強さとなっていたのでしょうか？

震源は牡鹿半島の沖約120kmの大陸棚斜面の直下約24kmです。揺れ方をみると、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¹⁾・糸魚川-静岡構造線²⁾および脊梁火山列³⁾を境にその強さが変化しています(図1)。東北日本では、脊梁火山列を境に、太平洋側では震度6弱～6強と非常に強く揺れていますが、日本海側では概ね震度4と急に弱くなっています。一方、関東～中部の地域では、柏崎-銚子線付近を境に、この北東側では震度6弱～6強に対し、この南西側では概ね震度4～5弱と弱くなっています。さらに糸魚川-静岡構造線を境に、この南西側では概ね震度3以下となっています。このように、地質構造が地震の揺れ方を規制する現象は、河角の震度階分布調査から解明されてきました⁴⁾。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も糸魚川-静岡構造線を境に揺れが変わることが明らかにされているところ^{5)・6)}。

なお、関東地域では5弱～5強の揺れが広がっています。この地下には約3千万年前から形成されてきた関東堆積盆地が広がっており、比較的軟らかな地層が厚く分布していることが関係していると考えられます。

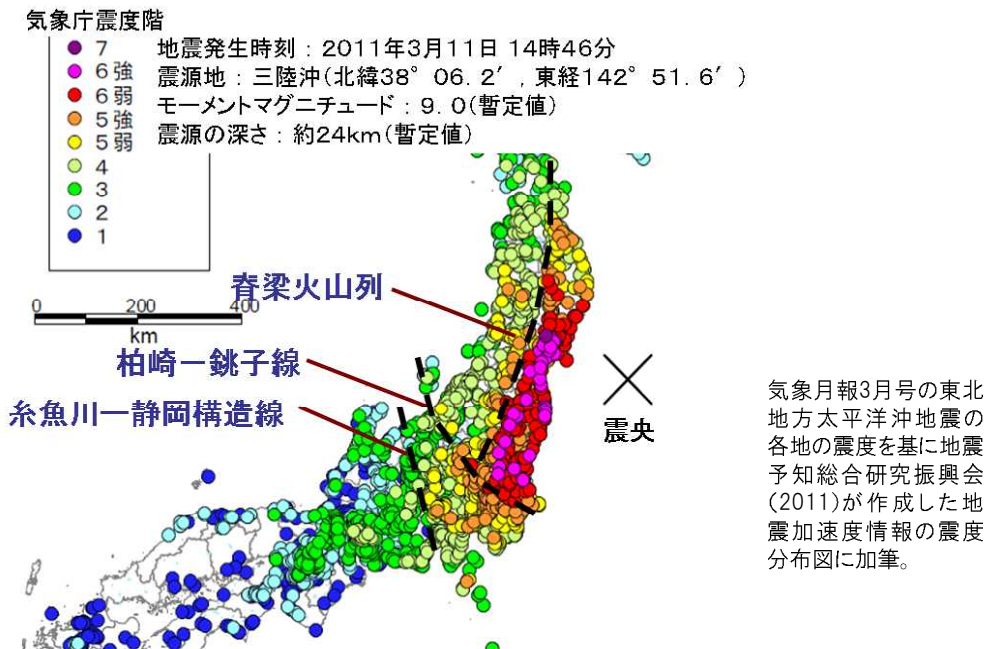
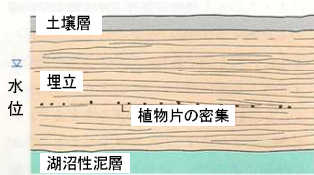


図1 東北地方太平洋沖地震の震央位置と揺れ(気象庁震度階)の分布^{11)・5)}

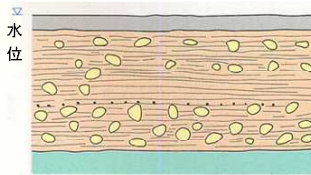
3. 液状化－流動化現象とは

今回の地震で発生した、液状化－流動化現象とはどのようなものでしょうか。液状化とは地層粒子の隙間にある地下水の水圧が高まり、水圧を示す地下水位が地表に達すると粒子が水に浮いた状態となり支持力がなくなる状態をいいます(図2C)。地下水位が地表を超えると地下水が湧き出し、粒子もともに流動をはじめ、これを流動化と呼びます⁴⁾(図2D)。流動は図2に示すように、まず部分的に始まり、これが拡大し層状な拡がりをもっていきます。地表では地波や噴砂・噴水が始まり、これに伴い液状化部分が流動し地中ではラミナ(地層形成時にできる模様)が壊され、新たな堆積構造が形成されます。噴水がおさまり水圧が低下するに従い、地表面の沈下がゆっくりと進んでいきます(図2F)。こうして液状化－流動化が終息しても締め固まることはなく、液状化前よりも緩詰まりになっている場合もあります。なお、液状化－流動化は、粘着力を増す粘土鉱物を含む泥層では起こりにくく、砂層で起こりやすいという特徴があります。

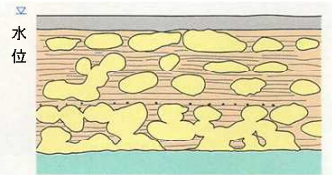
A 地震前:埋立層はラミナ模様がみられる砂層で泥質分を含む。地下水位は高く地表下30～40cmにある。



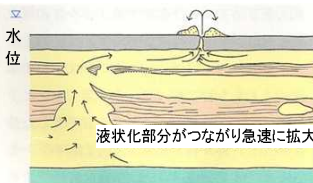
B 地震動が起き間隙水圧が上昇、地下水位は地表面近くに上がる。斑点状に液状化が始まり、砂層のラミナが消える。



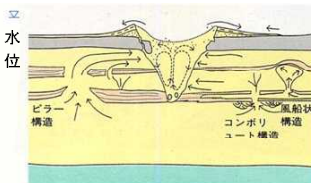
C 地震動が続き水圧は高い。点状に溶けた部分がつながり始め、体積を増やし動きが激しくなる。



D 水圧はさらに高まり地下水位は地表面を超える。液状化した地層が地下水と混じって流動化し、地表から噴出し始める。



E 水圧は依然高い、噴き出し口は対流運動によって側壁を崩しながら大きくなり、大量の地下水が噴き出る。



F 地震動がおさまり水圧が減少し、地下水位は下がる。噴砂孔からの噴出は次第におさまり噴砂孔内の地層が沈殿する。

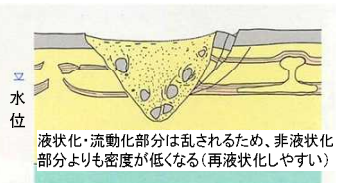


図2 液状化－流動化の過程

2003、アーバンクボタNo.40「液状化・流動化」
(株式会社クボタ発行)より

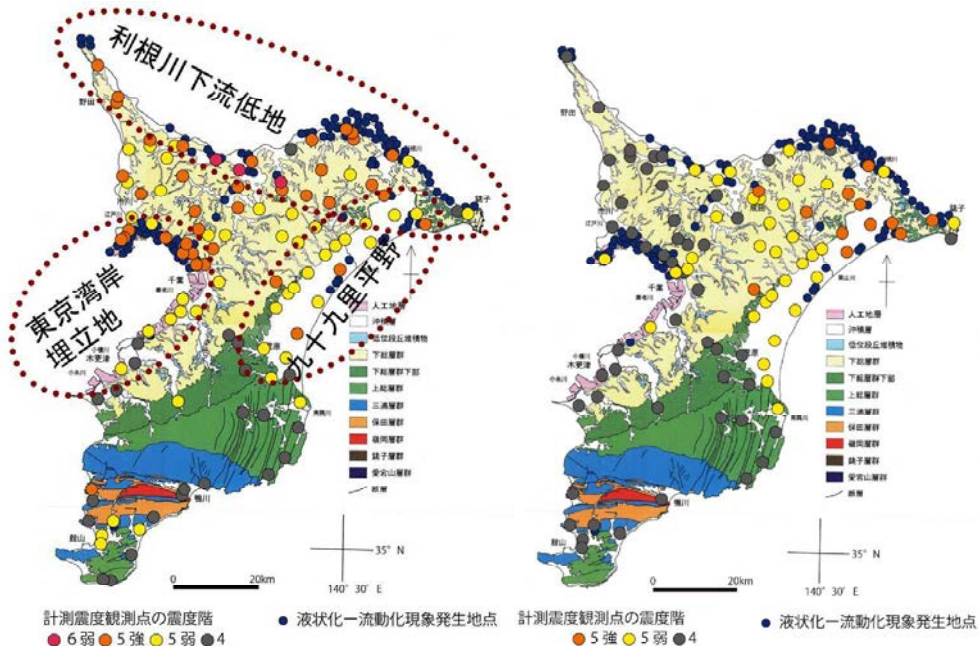


図3 房総半島での震度分布と液状化一流動化現象の分布. 左が14時46分の本震、右が15時15分の最大余震。液状化一流動化現象はほとんどが人工地層上に発生している。震度は当センターの強震計および気象庁(2011、地震月報3月号)より。地質図は千葉県資料研究財団(楡井ほか、1996、千葉県自然誌第2巻 付図千葉県地質図)より。

4. 地震の揺れと、液状化一流動化現象の分布

4.1 房総半島での震度分布と液状化一流動化現象の分布

これまでの当センターによる調査から、液状化一流動化現象は、東京湾岸埋立地・利根川下流低地・九十九里平野北部を中心にみられ、これら地域の多くは海域、湖沼、旧河道などをサンドポンプ工法によって埋め立てられた人工地層上であることが分かりました。

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穴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となります。同じ人工地層でも、谷津田を埋めた盛土地では、本震の際6弱と非常に強く揺れた印旛沼周辺～成田を中心に、わずかにしかみられませんでした(図3)。図3はこの現象の分布と揺れの強さを示す震度の分布を重ね合わせたもので、図の左は14時46分の本震時の震度、右は15時15分の最大余震時の震度を重ね合わせたものです。

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でした。液状化一流動化現象は5強の揺れがあった北部でみられ、5弱で揺れた南部ではごく一部にしかみられま

せんでした。

利根川低地では、本震時には東庄町～銚子市では震度5弱であったものの、ここ以外では5強～6弱と強く揺れました。最大余震時には香取市～銚子市が5弱～5強の揺れでしたが、この西では4～5弱でした。

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、ここ以外は広い範囲で5弱の揺れでした。最大余震時には匝瑳市今泉以北で5強以上の強い揺れでした。

液状化は以下の3条件がそろって発生することが知られています^{8)・9)}。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強い揺れがあること。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し部分は、常に①と②の条件下にあるので、③の揺れの強さに液状化の発生は強く影響されることになります。今回の地震では、本震と最大余震のいずれかで5強以上の揺れとなった地域を中心に発生しました。

4. 2 東方沖地震と太平洋沖地震の際の液状化－流動化現象の分布の比較

図4には、1987年12月に起こった東方沖地震の震度分布を示しました。東方沖地震時には県内には地震計がわずかしかなく揺れの状況が把握できなかったため、河角の震度階アンケート⁴⁾により揺れを把握しました¹⁰⁾。また、図5には、東方沖地震と太平洋沖地震での液状化－流動化現象の分布を示しました。

東方沖地震は震源が一宮町の沖合の深さ約60kmの房総半島のほぼ直下の深部でしたので、房総半島全体が広範囲に比較的強く揺れ、液状化－流動化現象は広範囲でみられました(図5)。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強以上の強い揺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ました。

房総半島北部をみてみると、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ます(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、その程度は著しいものとなっています。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、地表の沈下もほとんどみられませんでした。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以上の沈下も発生しています。後に述べる浦安市や千葉市美浜区の埋立地でも同様です。

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ましたが、太平洋沖地震では

ほとんどみられていません。

東方沖地震では、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、必ずしも揺れと液状化－流動化現象の発生との関係は明らかになっていませんでした。今回の地震では、震度と液状化－流動化との関係が明瞭になりました。すなわち震度5強以上の揺れがあり人工地層が分布した地域では液状化－流動化現象がみられています。また、5弱の揺れのあった人工地層分布域の一部でこの現象がみられています。

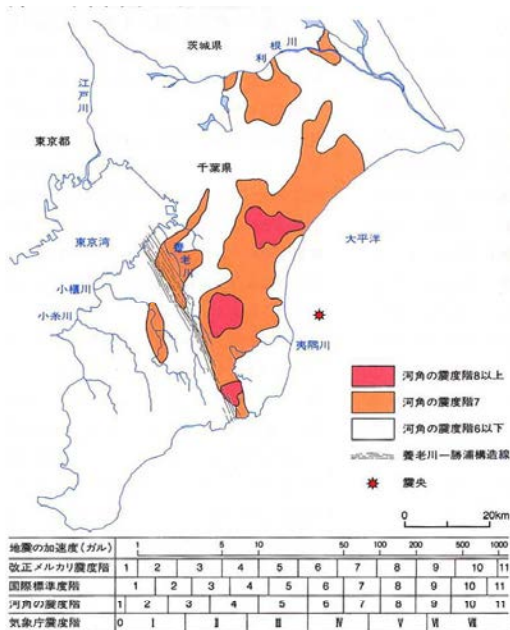


図4 東方沖地震時での河角の震度階分布 (千葉県地質環境研究室、2003 アーバンクボタNo.40(株式会社クボタ発行)より)

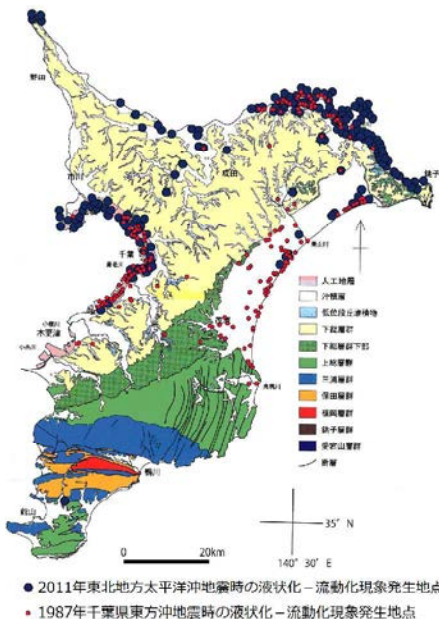


図5 太平洋沖地震と東方沖地震の際の液状化－流動化分布の比較

5. 太平洋沖地震による液状化－流動化現象と被害状況

房総半島全域での実際の状況や被害がどのようなものであったのかを把握するため、液状化－流動化現象が起こりやすい埋立地や盛土地、沖積層(約2万年前の最終氷期に刻まれた谷などが埋められてできた地層、軟弱な地層)の厚いところ、旧河道、東方沖地震時に同現象がみられたところを中心に調べました。結果を以下に示します。

5.1 房総半島全域に共通する特徴

①人工地層(埋立層・盛土層など)分布域を中心に、噴砂・地表面の沈下や地波・電柱

や建物の沈み込み・ライフラインの障害などの液状化—流動化現象による被害がみられます。

- ②房総半島北部に広く液状化—流動化現象がみられたのは、揺れが北部で強かったことが主因と思われます。特に、震度5強以上のところでこの現象が生じています。
- ③房総半島北部の東方沖地震時に液状化—流動化したところでは再び起こっており、東方沖地震時と比べその規模・被害程度ははるかに大きなものになっています。これは、強い揺れが長く続いたためと考えられます。
- ④沈降した戸建て構造物では、べた基礎のほうが布基礎よりも沈降量が小さい傾向がみられます。これは、布基礎のほうが地層との接地面積が小さいためと考えられます。
- ⑤噴砂には、亀裂からの噴砂・直線状に並ぶ噴砂・単独の噴砂・巨大噴砂孔を伴う大規模噴砂の形態が認められます。また、噴砂の多くは粒径の揃った粗粒シルト～細粒砂(粒径31～250 μm)から構成されています。これは、房総半島は第四紀(258万年前～現在の地質時代)の初めに発生した古関東深海盆地に堆積した地層が隆起し形成されたため、主に細粒な砂層と泥層から構成され、これらが人工地層材料になっているという地質特性によります。
- ⑥P.23に示したような地盤改良等の液状化対策が施された場所ではほとんど被害がみられていません。

5.2 東京湾岸埋立地での被害の特徴

太平洋沖地震では、東京湾岸埋立地において著しい液状化—流動化現象により大きな被害が発生しました。ここでは、典型的な被害がみられた千葉県美浜区と、浦安市の状況を中心に紹介します。

5.2.1 浦安地区の液状化—流動化被害の詳細調査結果

千葉県美浜区の埋立地では、液状化—流動化現象が全域に一樣には起こっておらず、この現象が起きていないところもありました。浦安では埋立地の全域が液状化しているとの報道もあり現地を概査したところ、ここでもこの現象は斑(まだら)状にみられました。そこで、液状化—流動化の状況を把握するため2つの方法で調べました。一つは、杭基礎構造(軟弱地盤の場合に深く杭を打ち込み構造物を支える基礎構造)を持つと思われるビルを利用し液状化—流動化による抜け上がり量を定量的に調べました。液状化—流動化が起こった部分の地層は縮むのでこれよりも深いところまで杭基礎が入っている建物の入り口と地表に段差ができこの差を抜け上がりと呼びます。もう一つは、地表の変形の程度や構造物の沈み込み方により液状化—流動化現象を4つにタイプ区分しその分布を踏査で調べました。このタイプ区分を表1に、代表的な状況を



写真9 各タイプ
の状況例

表1 東京湾岸埋立地での液状化－流動化現象のタイプ区分

タイプ名	液状化－流動化現象の地表での被害の現れ方
Aタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・地表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。 ・多量の噴砂。低層の構造物は大きく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。
Bタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・地表は波打ち鉛直方向に10～20cm程度の凹凸や段差がみられる。 ・噴砂が発生。低層の構造物は傾いたり沈み込んだりしている。 ・電柱や塀は傾いたり10～20cm程度沈み込んだりしている。
Cタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・地表は数cm程度のわずかな波打ち・沈下や亀裂がみられる。 ・噴砂が発生。低層構造物は微少に傾き沈み込んでいるものがある。 ・電柱に沈降や傾きはほとんどみられない。まれにレンガ塀などに傾きがみられることがある。
Dタイプ	<ul style="list-style-type: none"> ・道路は亀裂や凹凸などはみられない。 ・噴砂は無い。低層構造物・電柱・塀に沈み込みや傾きはみられない。

写真9に、調査結果を図6に示しました。空白部は未調査地域です。結果の概要は以下のとおりです。

- ①液状化－流動化現象は旧海岸線よりも内陸側の自然地層である沖積層上にはほとんどみられず(工事などで掘り返した地点を除く)、旧海岸線以南の埋立地においてみられるので、主に人工地層中で液状化－流動化現象が発生していると推定されます。
- ②埋立地の中では、全域が一様に液状化－流動化しているわけではなく、被害状況が異なるAタイプ～Dタイプが混在し、斑状に分布しています。Aタイプは、首都高速湾岸線以北ではみられず、ここから旧護岸にかけて幅100m長さ500m程度の帯状に分