

## 東京湾周辺の液状化被害とその評価



名古屋大学  
大学院工学研究科 社会基盤工学専攻  
減災連携研究センター

野田 利弘

## 東京湾沿岸部で生じた液状化被害

地盤工学会11号(第1回東北地方太平洋沖地震災害調査報告会資料)  
<http://www.jiban.or.jp>



震源から約450km離れており、地表面観測記録で最大100～200gal程度にもかかわらず、広範に液状化が発生。

## 液状化が発生・・・噴砂、沈下、不等沈下、建物基礎との段差、など



浦安

噴砂



周辺地盤の沈下による建物基礎との段差



道路の不等沈下



我孫子市布佐  
建物の不等沈下

## 液状化が発生・・・電柱の傾斜と沈下、マンホールの浮き上がり、側方流動、など



我孫子市布佐  
↑電柱の傾斜と沈下



←軽量構造物(マンホール)の浮き上がり

浦安 提供:福田氏

↓護岸の側方流動



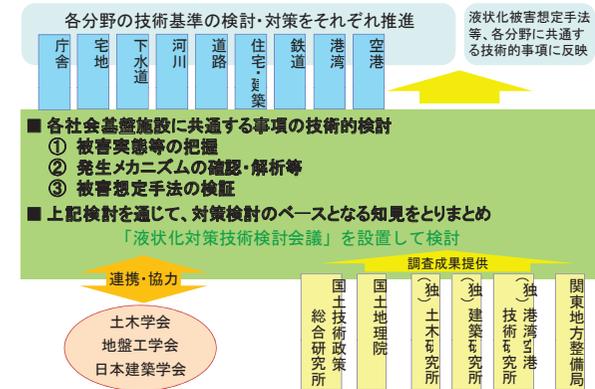
浦安 提供:野津氏

本日の内容

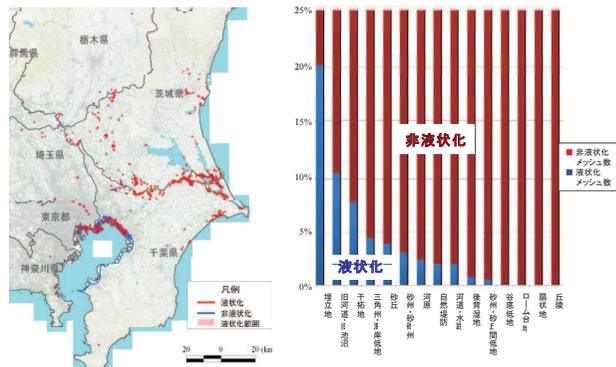
1. 国土交通省液状化対策技術検討会議の報告
2. 液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~
3. 液状化対策の効果について
4. 東海地方の液状化危険度について

国土交通省  
液状化対策技術検討会議

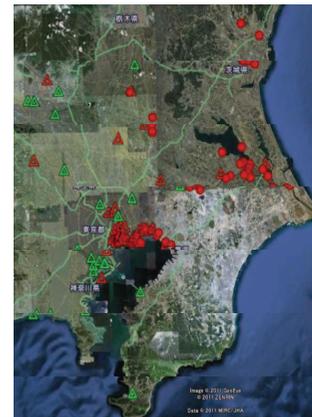
図表は、会議公表資料からの抜粋



関東地方の液状化発生箇所分布



液状化発生状況と  $F_L$  値の検討



		被害形態		合計
		液状化発生箇所	非液状化発生箇所	
判定結果	$F_L \leq 1$ 液状化	●:53	△:35	88
	$F_L > 1$ 非液状化	●:0	△:24	24
合計		53	59	112

従来の液状化判定法でも、見逃し(液状化しないと判定されて液状化した)はなかった。

### 液状化判定とは

このような「液状化」が発生するかどうか判定することを「液状化判定」という。液状化の発生の予測や液状化対策を実施する上で最も基本となる技術。一般に、液状化に対する抵抗力 $F_L$ を下向きにより求め、この値が1.0以下のとき、すなわち、地震によって作用する力の大きさが土の液状化に対する強さを上回るとき、液状化するとみなす。

$$F_L = R / L$$

$F_L$ : 液状化に対する抵抗力  
 $R$ : 土の液状化に対する強さを表す  
 $L$ : 地震によって作用する力を大きさを表す

今回の検討では、道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(平成14年3月)に示された方法に従って液状化判定を実施した。この液状化判定法では以下のとおり、 $R$ と $L$ を計算することとなり、土層構成、地下水位、標準貫入試験結果、細粒含有率が分かれば、深度ごとの $F_L$ を求めることができる。

$$R = c_w R_L$$

$$L = r_d k_{eq} \sigma_v' / \sigma_v'$$

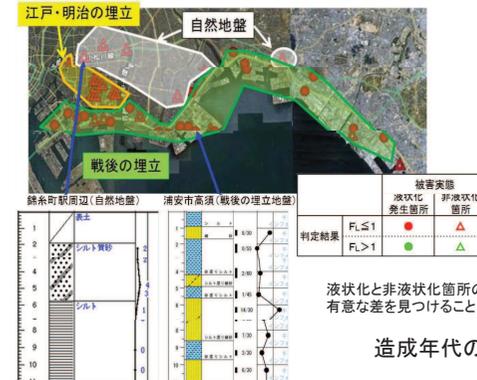
$$R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{N_{60}/1.7} & (N_{60} < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_{60}/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_{60} - 14)^{4.5} & (14 \leq N_{60}) \end{cases}$$

$$N_{60} = c_1 N_1 + c_2$$

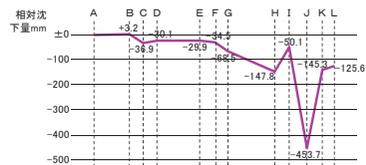
$c_w$ : 地震動特性による補正係数  
 $R_L$ : 繰返し三軸強度比  
 $r_d$ : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数  
 $k_{eq}$ : 地盤面における設計水平震度  
 $\sigma_v$ : 全上載圧  
 $\sigma_v'$ : 有効上載圧  
 $N_{60}$ : 粒度の影響を考慮した補正N値  
 $N_1$ : 有効上載圧100kN/m<sup>2</sup>相当に換算したN値  
 $c_1, c_2$ : 細粒含有率によるN値の補正係数

### 液状化発生状況と $F_L$ 値の検討 ~東京湾沿岸部~

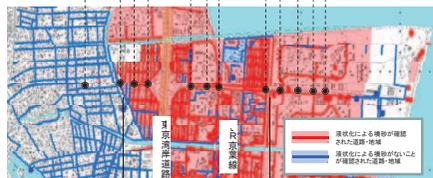
液状化発生は、戦後の新しい埋立地がほとんどで、古い埋立地では見られない。自然地盤や古い埋立地では、非液状化であるが $F_L \leq 1$ となった箇所が多い。



### 液状化発生箇所と沈下量の関係 ~浦安市~

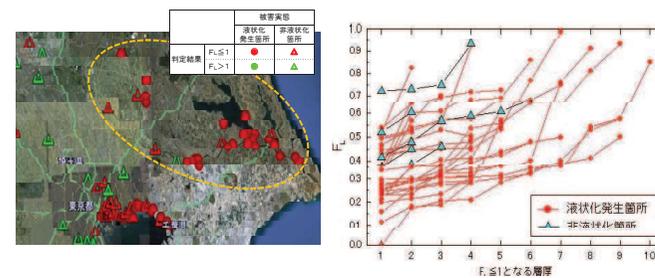


海側の最近の埋立地で大きく沈下し、古い埋立地ほど沈下が小さい傾向が見られる。



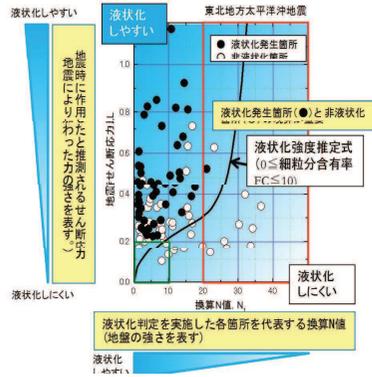
S39以前の陸地      S40~46埋立      S47~53埋立

### 液状化発生状況と $F_L$ 値の検討 ~利根川下流周辺地域~



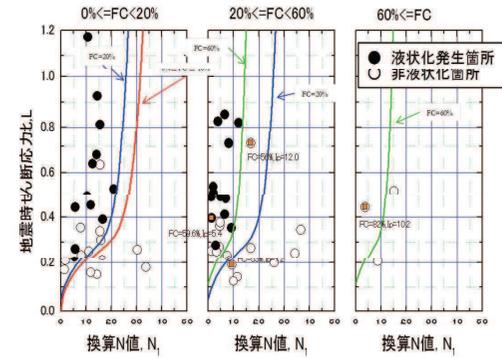
$F_L \leq 1$ (液状化)と判定された非液状化箇所は、液状化発生箇所に比べて、  
 周辺地域と比べて、 $F_L$ の値が比較的大きい。  
 $F_L \leq 1$ となる層厚が薄い。

### 地盤強度(N値)の影響に関する検討



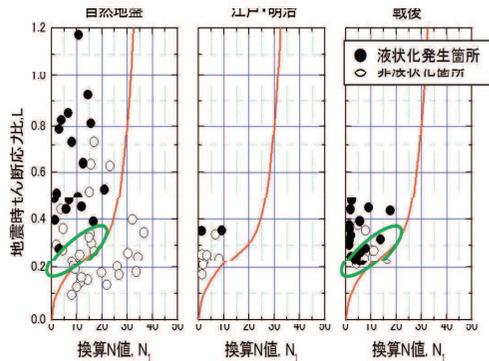
概ね、現行の液状化判定法で用いられている液状化強度推定式と整合。

### 細粒分含有率(Fc)の影響に関する検討



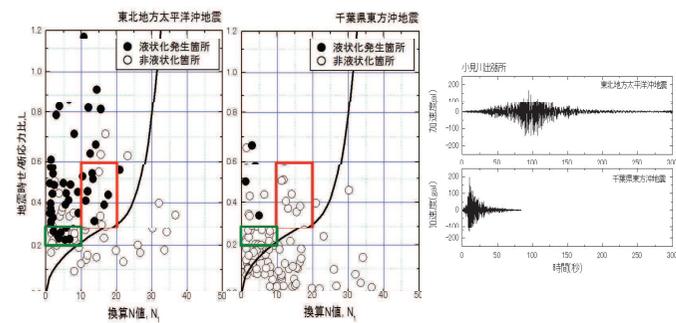
細粒分が多いほど液状化強度が大きく、現行FL法の液状化強度推定式と整合。液状化強度推定式の左上に、非液状化箇所(O)が存在することから、細粒分の性質や量が液状化に及ぼす影響について詳細に分析する必要がある。

### 地盤の造成年代の影響に関する検討



造成年代が新しい地盤の方が古い地盤より液状化しやすい傾向。造成年代による液状化強度増加のメカニズム等は不明な点も多く、今後、詳細な分析を実施する必要がある。

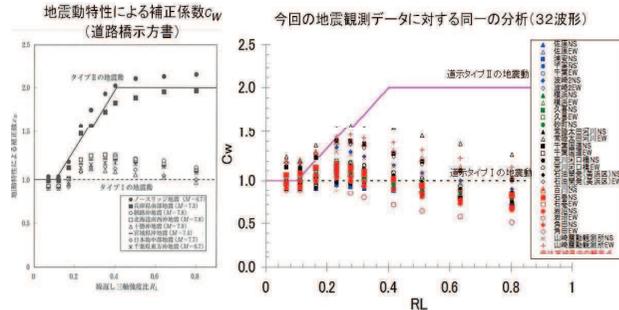
### 地震動の継続時間の影響に関する検討



継続時間の影響は見られるものの、現行の液状化強度推定式は、今回の地震による液状化発生箇所を包含している。

## 地震動特性を考慮する係数 $c_w$ の検証

現行FL法では、揺れの長い海溝型地震と揺れの短い直下型地震それぞれに係数を設けて計算し、地震動特性を考慮している。



液化強度が低い土 ( $R_L \leq 0.4$ ) では、 $c_w=1$  程度となり、従来の知見と概ね整合。継続時間と繰返し回数が液化化に及ぼす影響については、引き続き検討する。

## 現行FL法による今回の地震被害の分析①

- ・ 液化化発生箇所で「液化化しない」と判定される「見逃し」はなかった。
- ・ 細粒分が多くなると、液化化強度が大きくなる傾向が見られ、現行FL法における液化化強度推定式と整合した結果がみられた。
- ・ 埋立等の造成年代が新しい地盤が、古い地盤より液化化しやすい傾向が見られたが、液化化の見逃しが生じるほどの傾向ではなかった。
- ・ 地震動の継続時間が長かった今回の地震では、過去の短い地震と比較して液化化しやすい傾向が見られたが、見逃しが生じるほどではなかった。
- ・ 地震動特性を考慮する係数  $c_w$  について、液化化強度が低い土に対しては、従来の知見と概ね整合する結果であった。

## 現行FL法による今回の地震被害の分析②

現行FL法は直ちに見直す必要性は低いものと考えられる。

- △ 非液化化箇所でも「液化化する」と判定されるケースが相当数みられた
- △ 発生有無を判定するもので、地盤変形量等の予測ができるものではない



更なる研究を進め、**液化化判定法等の高度化**を目指すべき。

## 液化化判定法等の高度化にむけた今後の課題

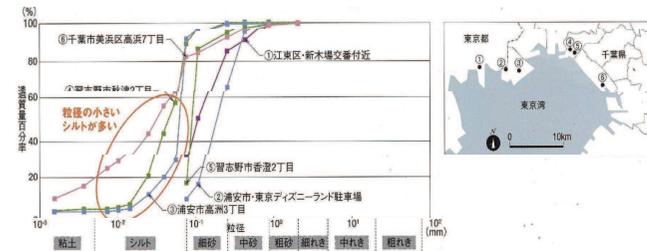
- 地震動の継続時間の長さや繰返し回数が液化化に及ぼす影響の定量的評価
- 液化化地点の有効応力解析によるシミュレーション解析
- ボーリング調査の実施とボーリングデータの継続的な収集・整理
- 液化化発生状況と地形的特徴の関係
- 液化化対策工の定量的な評価
- 液化化に及ぼす諸要因(継続時間、細粒分、造成年代etc)の分析

本日の内容

1. 国土交通省液状化対策技術検討会議の報告
2. 液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~
3. 液状化対策の効果について
4. 東海地方の液状化危険度について

液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~

東京湾岸で採取した砂試料の粒径分布



出典：東日本大震災の教訓(土木編)インフラ被害の全貌, 日経コンストラクション編

一般に、細粒分(粘土, シルト)を多く含む砂は液状化しにくいと言われている。

**細粒分(粘土, シルト)を多く含む砂質地盤においてさえ、液状化被害が多数発生した。**



- 加速度は100~200gal程度とさほど大きくないにもかかわらず、広範に液状化が発生。
- 細粒分を多く含む粘土のような地盤でも液状化が発生。



「地震の継続時間が長かった」  
ことばかりが強調される。  
(これは半ば正しい)

液状化した埋立層と液状化しなかった埋立層の差異は、いまのところ埋立時期の違いで「説明」されている。 → 本当!?

浦安市の液状化域と埋め立て履歴

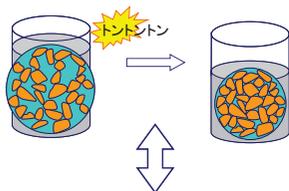


出典：東日本大震災の教訓(土木編)インフラ被害の全貌, 日経コンストラクション編

粘土分, シルト分を多く含む地盤の「液状化」には何が必要か? それを先に説明する。

## 砂と粘土の違い

**砂**は、繰り返し負荷によるごく僅かの塑性変形でも骨格構造が容易に壊れる。(トントントンによる、締固め/液状化)



**粘土**の骨格は、トントントンでは壊れない。大きな塑性ひずみの進展が必要。

## 液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~

粘土分、シルト分を多く含む土が液状化するためには、**大きな塑性ひずみの進展**が必要。

↓**そのためには、**

**長周期で、しかも多数回の  
繰り返し負荷**による

**大きな変位・変形**が必要！

つまり、**長周期化/長周期成分の増幅**が必要。  
これは何によっておこるか？

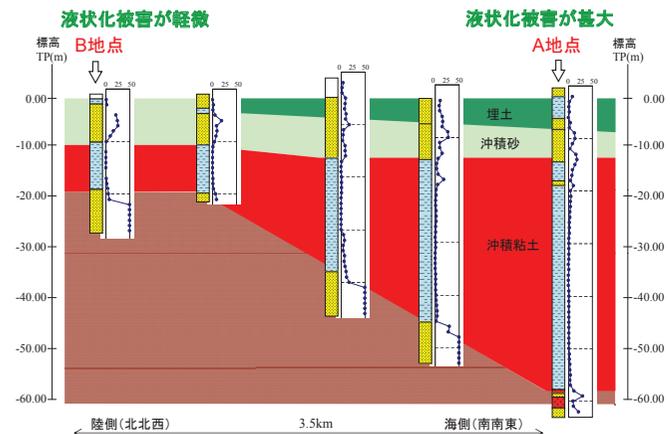
(答)液状化したシルト質層の下部に存在した厚い粘土層が理由！

## 液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~

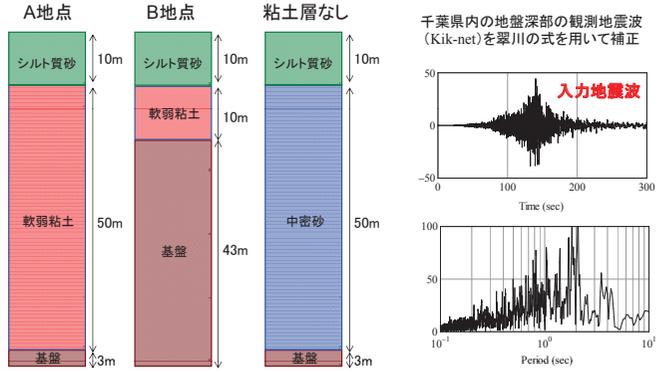
### 浦安市の地層断面図



### 浦安市の地層断面図



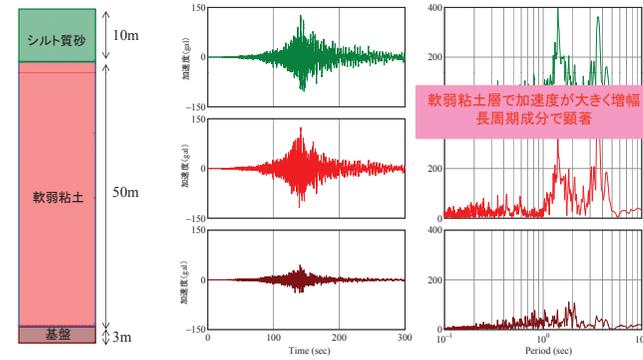
### 深部地層構成に応じた表層土の地震時挙動



水～土連成有限変形解析プログラム **GEOASIA** を使用

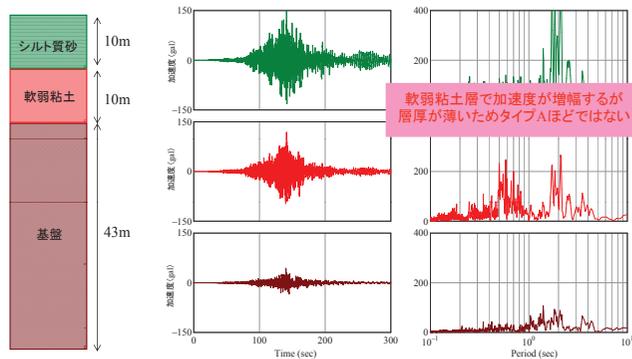
### 液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～

#### A地点 ～層境での加速度応答～



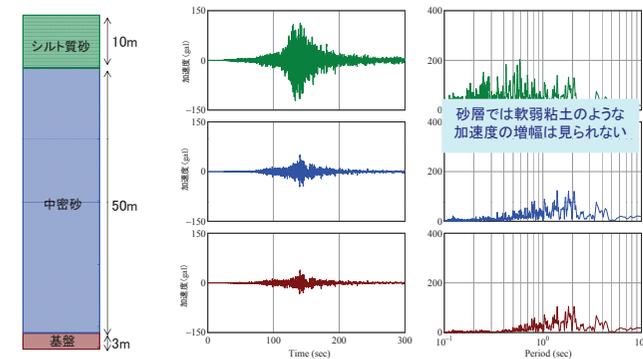
### 液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～

#### B地点 ～層境での加速度応答～



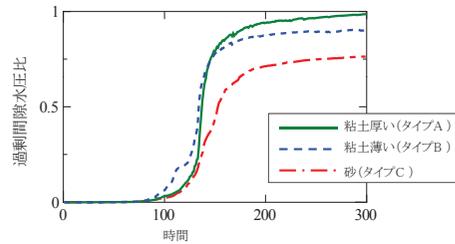
### 液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～

#### 粘土層なし ～層境での加速度応答～



液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～

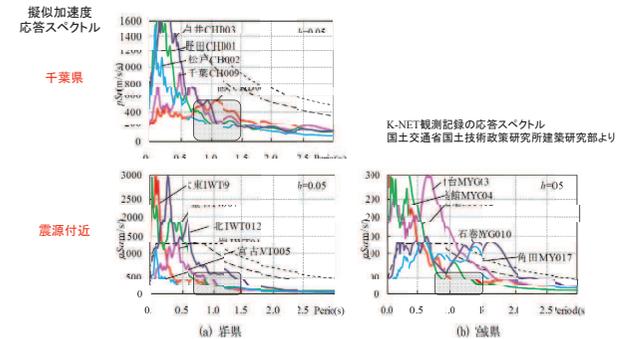
シルト質砂層中央部における過剰間隙水圧比の比較



軟弱層の存在が地震波が増幅させ(特に大きなせん断変形を生じさせる(1秒以上の)やや長周期成分で顕著)、表層の土が液状化しやすくなることを数値解析で確認。

液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～

浦安と震源付近での擬似加速度応答スペクトルの比較



周期1～1.5秒付近では、浦安市は近隣の他の地域よりも大きく、震源近傍の地域に匹敵。

液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～



- 埋立地盤でのみ液状化被害が顕著(沖積地盤では液状化被害が少ない)
- 加速度は100～200gal程度とさほど大きくないにもかかわらず、広範囲で液状化発生。
- 細粒分を多く含む地盤で液状化被害が発生した。



- 地震の継続時間が長かった。
- 大きな変位を引き起こす1～2秒以上のやや長周期成分の波動が伝播していた
- 液状化層の下に厚く堆積する軟弱粘土層の存在

本日の内容

1. 国土交通省液状化対策技術検討会議の報告
2. 液状化被害の特徴 ～有効応力解析による分析～
3. 液状化対策の効果について
4. 東海地方の液状化危険度について

## 液状化を防ぐためには

### 浦安で生じた液状化被害と対策効果



ディズニーランド駐車場で液状化被害の様子。  
施設内は地盤改良しているため、無被害。



改良なし



SCP改良

同一地区でも、地盤改良している箇所は無被害



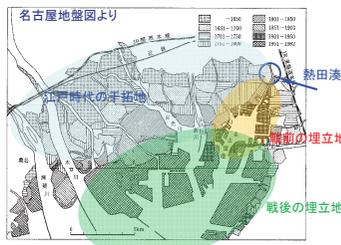
地盤改良(SCPやグラベルドレーンetc)が施されている場所は液状化していない。

## 本日の内容

1. 国土交通省液状化対策技術検討会議の報告
2. 液状化被害の特徴 ~有効応力解析による分析~
3. 液状化対策の効果について
4. 東海地方の液状化危険度について

## 東海地方の液状化危険度

江戸時代の干拓と明治以降の埋立によって、国土を広げてきた。



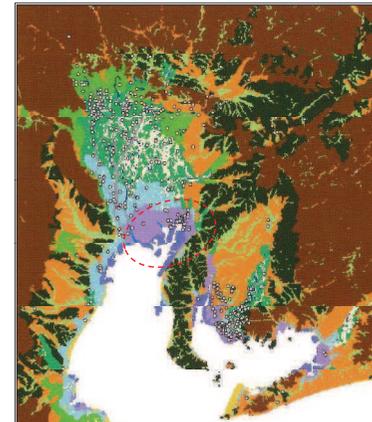
1944年 東南海地震発生  
1945年 三河地震発生

名古屋港湾の埋立地のほとんどが、巨大地震を経験したことがない。



4500haの埋立地のうち約8割が  
1945年以降に埋立てられる。

## 東海地方の液状化危険度

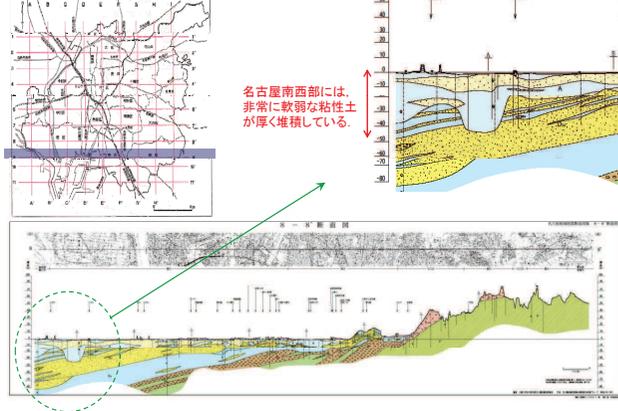


名古屋港湾の埋立地のほとんどが、巨大地震を経験したことがない。

若松加寿江(2011)  
『日本の液状化履歴マップ745-2008』  
東京大学出版会(製品シリアル番号:JLM0001)

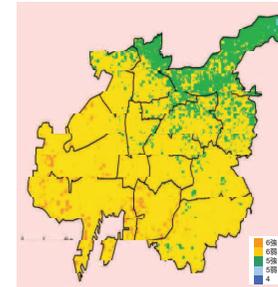
### 東海地方の液状化危険度

最新名古屋地盤図(土質工学会中部支部)

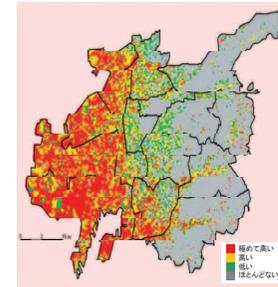


### 名古屋市の想定東海・東南海地震でのハザードマップ

【震度分布】



【液状化危険度マップ】

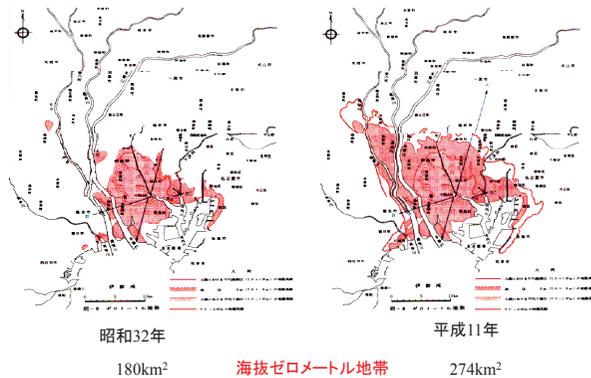


名古屋市HPより (<http://www.city.nagoya.jp/kurashi/category/20-2-5-6-0-0-0-0-0-0.html>)

自分達の暮らす地域の情報を正確に知ることが重要

### 東海地方の液状化危険度

伊勢湾台風以後に地盤沈下を拡大させた!!  
もはやほとんど回復不可能



ご清聴ありがとうございました.

ご意見、ご質問などございましたら、下記までお願いいたします。

[noda@nagoya-u.jp](mailto:noda@nagoya-u.jp)