

# 2011年東北地方太平洋沖地震の事例による 利根川流域周辺の液状化危険度推定の検証

大角 恒雄<sup>1</sup>・末富 岩雄<sup>2</sup>

<sup>1</sup> (独) 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域 災害リスク研究ユニット  
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

E-mail: t\_ohsumi@bosai.go.jp

<sup>2</sup> 株式会社エイト日本技術開発 東京支社 防災保全部 耐震・保全グループ  
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震においては、東京湾沿岸や利根川流域周辺など関東地方の広範囲で液状化が発生した。特に戸建住宅の被害が集中したことが特徴であり、実効性のある液状化対策が期待される。本論文では、今後の液状化危険度の検討のため、広域を対象とする際の地形分類に基づく方法と比較的限られた範囲を対象とする際のボーリングデータに基づくPL法を組み合わせた算出方法を提案し、震災での被害実態に照らし合わせ、その妥当性を確認した。

**Key Words :** Liquefaction, PL value, 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Kanto resion

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸や利根川流域周辺等、関東地方の広い範囲で顕著な液状化が見られた。今回の地震で特徴的な事象は、戸建て住宅の被害が数多く生じたことである。震災直後は、その実態が不明であったが、徐々に家屋がわずかに傾いたものでも健康への影響は大きく、居住を続けるには苦痛をとまなうという深刻さが明らかになった。また河川堤防被害も多かったというような背景から、国土交通省関東地方整備局と地盤工学会による液状化範囲・地点の詳細な調査が行われ<sup>1)</sup>、さらには浦安市<sup>2)</sup>、千葉市、鹿嶋市、香取市、等の住宅被害が顕著であった自治体では、液状化対策を検討するための委員会を設け、液状化原因の解明と対策検討が行われている。

今後の液状化対策を検討する上では、液状化危険度を適切に評価する必要がある。道路橋示方書<sup>3)</sup>などに基づく耐震設計や防災計画策定のための地震被害想定など、液状化危険度を表す指標として $P_L$ 値が広く適用されている。利用する際の目的からも、やや安全側になることが多いものの、概ね妥当な結果が得られることは広く知られている。この方法は、ボーリングデータを必要とするので、行政機関による地震被害想定・液状化危険度マップや地震直後のリアルタイム推定のように面的な液状化危険度分布

を必要とする場合には留意する必要がある。東京ガスの地震防災システムSUPREME<sup>4)</sup>に代表される密なボーリングデータを活用できる場合は空間補間を適用すれば精度よく評価できるが、データが乏しい場合は精度が低くなる可能性がある。

液状化危険度は微地形と密接な関係があるので、微地形区分による簡易判定もしばしば行われる。

本論文では上述のようにボーリングデータを用いる方法、微地形区分による方法、両者を組み合わせる方法について検討する。2011年東北地方太平洋沖地震における関東東部では、比較的ボーリングデータが整備されており、液状化被害の状況も整理されているので、利根川流域周辺を中心に比較・検討を行う。

## 2. 液状化危険度の推定手法

### 2.1 地形分類による方法

微地形区分と地震動の大きさから液状化危険度を評価するものとしては、損害保険料率算出機構の方法<sup>5)</sup>がある。これは、表-1に示すように液状化の可能性から微地形を4つのグループに分類している。文献5)で用いている微地形区分は、若松・松岡<sup>6)</sup>による微地形区分とは少し異なっている。本論文では今後の他地方での利用を見ずえて、全国の250mメッシュで整理されている地震ハザードステーション

(J-SHIS)<sup>7)</sup>の微地形区分データを用いる。そのため、表-1では、J-SHISデータに対応するように修正している。4つのグループの液状化発生率は、最大速度PGVの関数として次式で与えられる。パラメータを表-1に、式の形状を図-1に示す。

【グループ1～3 (低地)】

$$\begin{cases} P(PGV) = 0 & (PGV \leq 15) \\ P(PGV) = \Phi\left(\frac{\ln(PGV) - \lambda}{\zeta}\right) & (15 < PGV) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $P(PGV)$ ：液状化発生率（液状化の発生するメッシュの割合）

PGV：地表最大速度(cm/s)

$\Phi$ ：標準正規分布関数

$\lambda, \zeta$ ： $\ln(PGV)$ の平均値と標準偏差（表-1参照）

【グループ4 (山地・丘陵・台地)】

$$P(PGV) = 0 \quad (2)$$

表-1 微地形グループと液状化発生率のパラメータ

液状化可能性グループ	若松ら <sup>6)</sup> による微地形区分	平均値 $\lambda$	標準偏差 $\zeta$
グループ1	自然堤防、旧河道、砂洲・砂丘間低地、干拓地、埋立地、河原、河道	3.561	0.393
グループ2	後背湿地、三角州・海岸低地	3.722	0.402
グループ3	谷底低地、扇状地、砂洲・砂礫洲、砂丘	4.014	0.469
グループ4	山地、山麓地、丘陵、火山性丘陵、岩石台地、砂礫質台地、ローム台地、礫・岩礁	—	—

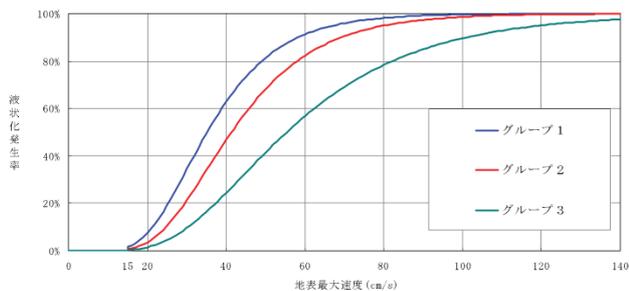


図-1 液状化発生率の予測式（グループ1～3）<sup>5)</sup>

パラメータは、1983年日本海中部地震と2004年新潟県中越地震の2地震のみで決定されているため、その点は課題としてあるものの、簡易な液状化予測式として有用と考えられる。

なお、式(1)の液状化発生率は、本論文で液状化危険度の指標とする $P_L$ 値とは異なる。概ね、液状化しやすい地形で40cm/s程度で液状化の可能性が高くなるので、本論文では液状化発生率60%が $P_L$ 値15に相当するものとして換算して用いる。

## 2.2 ボーリングデータによる方法

ボーリングデータを用いる場合、液状化判定で広く用いられている液状化指数( $P_L$ 値)により予測する。これは、 $F_L$ 法およびこれを深度方向に積分した $P_L$ 法（浅いところでの重みが大い）を用いて、液状化危険度を表すものである。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x) dx \quad (3)$$

ここで、 $x$ は表層からの深さ(m)、 $F_L$ は液状化に対する抵抗率( $F_L$ 値)である。 $F_L$ は下式によって深さ毎に算出される。

$$F_L = \frac{R}{L} \quad \dots \quad \begin{cases} F_L \leq 1.0: \text{液状化すると判定} \\ F_L > 1.0: \text{液状化しないと判定} \end{cases} \quad (4)$$

$R$ ；地盤が有する動的せん断強度比

$L$ ；地震時せん断応力比

$P_L$ 値と液状化危険度は、表-2のように関係づけられる。

表-2 液状化判定基準

区分	液状化の程度と対応
$P_L = 0$	液状化発生の可能性はかなり低い
$0 < P_L \leq 5$	液状化発生の可能性が低い
$5 < P_L \leq 15$	液状化発生のある可能性がある
$15 < P_L$	液状化発生のある可能性が高い

以下に手法の詳細を記す<sup>3)</sup>。

(1)地盤が有する動的せん断強度比  $R$

$R$ は、地盤の繰返し三軸強度比  $R_L$ を用いて、以下の補正式(5)により得られる。

$$R = c_w R_L \quad (5)$$

$c_w$ は地震動の繰返し回数（継続時間）が液状化に大きく影響することを表すための、地震動特性による補正係数である。道路橋示方書の方法では、プレート境界型地震では  $c_w = 1.0$  としているが、2011年東北地方太平洋沖地震のような巨大地震では、これより小さい方が適切とする指摘もある<sup>例え 8)9)</sup>。そこで、横浜市地震被害想定<sup>10)</sup>で適用しているように、時松・吉見<sup>11)</sup>の式を用いる。これは、繰返しせん断応力を一様振幅のせん断応力に換算する係数  $r_n$ を、式(6)のように地震規模  $M$  の関数として表している。

$$r_n = 0.1 * (M - 1) \quad (6)$$

これを、式(7)で、 $c_w$ に換算する。 $M = 7.5$ の際に、 $c_w = 1.0$ と道路橋示方書での値と一致し、 $M = 9.0$ では  $c_w = 0.81$ となる。

$$c_w = \frac{0.65}{r_n} \quad (7)$$

三軸強度比  $R_L$ は、次式により算出する。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (N_a \geq 14) \end{cases} \quad (8)$$

粒度の影響を考慮した補正 N 値( $N_a$ )は、砂質土については、東京低地部や多摩川流域のデータに基づく亀井ら<sup>12)</sup>の関係をを用いて、N値が小さい場合は細粒分を多く含むことを考慮する。

## (2)地震時せん断応力比 L

地震時せん断応力比 L は次式による。

$$L = r_d k_{hg} \frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \quad (9)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x$$

ここで、

$r_d$ : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$k_{hg}$ : 設計水平震度

$\sigma_v$ : 全上載圧(kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_v'$ : 有効上載圧(kN/m<sup>2</sup>)

$x$ : 地表面からの深さ(m)

設計水平震度は、童・山崎<sup>13)</sup>の関係(計測震度から最大加速度を予測する式)を用いて、計測震度  $I_{jma}$  から最大加速度  $\alpha$  を算出する。

$$k_{hg} = \frac{\alpha}{g} = 10^{(0.51 \cdot I_{jma} - 0.23)} / 980 \quad (10)$$

## 2.3 地形分類とボーリングを組み合わせる方法

末富ら<sup>14)</sup>では、地形分類による AVS30 とボーリングデータによる AVS30 を組み合わせて、各メッシュの AVS30 を算出している。 $P_L$  値においても、ボーリングデータが近くにあれば、それに基づくべきであり、周辺になければ地形分類によらざるを得ないという点は共通であるので、この方法を  $P_L$  値に適用する。

これは、次式に示すように、ボーリングデータによる  $P_L$  値の重み付平均の式に、地形分類による項を加えることで、ボーリングデータによる  $P_L$  値と、地形分類による  $P_L$  値を統合するものである。

$$P_{L_j} = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ij} P_{L_i} + w_g P_{L_{gj}}}{\sum_{i=1}^n w_{ij} + w_g} \quad (11)$$

ここで、 $w_{ij}$  は  $i$  番目のボーリングデータの  $j$  番目のメッシュに対する重みであり、 $r_{ij}$  は  $i$  地点と  $j$  地点間の距離である。この時、地形分類もメッシュ  $j$  の中心からの距離が  $r_g$  のボーリングデータとして扱うことにより、地形分類の重み  $w_g$  を式(12)に示すように表す。

$$w_{ij} = \frac{1}{r_{ij}^2}, \quad w_g = \frac{1}{r_g^2} \quad (12)$$

図-2 に考え方を示す。文献 14)では AVS30 に対し行っていることを、全く同じ考え方で  $P_L$  値を対象に行う。ここで、 $P_{L_j}$  はメッシュ  $j$  の推定  $P_L$  値、 $P_{L_i}$  は  $i$  地点のボーリングデータによる  $P_L$  値であり、 $P_{L_{gj}}$  は地形分類による当該メッシュの  $P_L$  値である。この  $P_{L_{gj}}$  の位置を、仮想的に距離  $r_g$  として、その重みを表すものである。

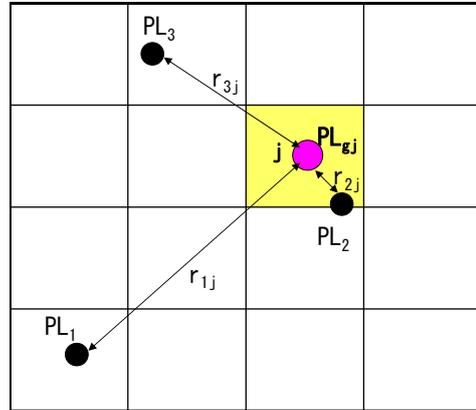


図-2 250mメッシュの $P_L$ 値をボーリングデータの $P_L$ 値と統合する算出法の概念

## 2.4 ボーリングデータの整備

「統合化地下構造データベース」<sup>15)</sup>を利用し、利根川流域周辺の茨城県・千葉県のボーリングデータをダウンロードまたはデジタル化を行い整備した。

## 3. 2011年東北地方太平洋沖地震における液状化危険度分布の推定と被害分布との比較

### 3.1 2011年東北地方太平洋沖地震における地震動

$P_L$  値の面的な分布を推定するためには、地震動分布が必要となる。ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震における観測値を補間し、250mメッシュでの地震動分布推定を行っている末富・福島<sup>16)</sup>による値を用いる。対象とする地域の250mメッシュの最大速度分布を図-3に示す。対象となる利根川周辺域は20~50cm/sとなっており、液状化しやすい地盤では液状化が生じるような大きさである。

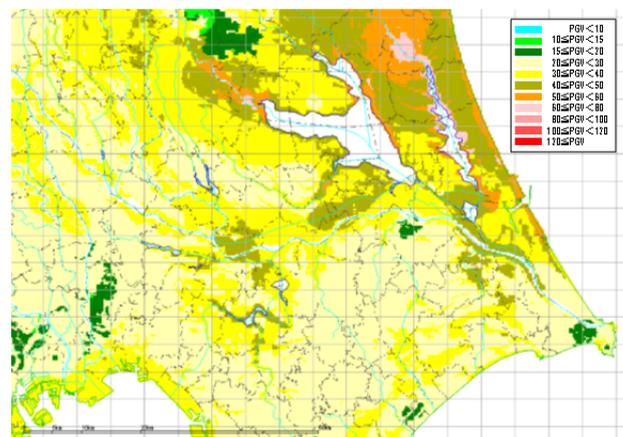


図-3 最大速度分布

### 3.2 液状化危険度分布の推定

図-4に示す微地形区分（J-SHISの250mメッシュ）を用いて、2.1で述べた地形分類による地震危険度分布の推定結果を、図-4 (a)に示す。

この地域は、ローム台地が広く、そこは液状化しておらず、推定結果も $P_L=0$ である。利根川沿いや霞ヶ浦の周囲では、三角州・海岸低地が広がっている。最大速度が40cm/sを超えているところで、危険度が高く( $P_L>15$ )なっている。干拓地も多いが、グループ1とグループ2の差異よりも、最大速度の差異の方が $P_L$ 値に影響する推定結果となっている。

これと、ボーリング地点での $P_L$ 値を重ねたのが図-5 (b)である。ボーリング地点の値の方が大きい傾向にある。これに、2.3で述べた統合手法を適用した結果が図-5 (c)である。図-5 (b)で、ボーリングデータが大きかったところが赤く変わり、利根川流域で $P_L>15$ のところが広がっている。

図-6 (a)と図-6 (b)は、国土交通省関東地方整備局が地盤工学会の調査<sup>1)</sup>に基づきとりまとめた液状化地点と重ねたものである。ボーリングデータと統合した図-6 (b)の方が、 $P_L$ 値が高いところと液状化地点との対応がよいことがわかる。

### 3.3 地域毎の考察

図-7に拡大図を示し○で囲んだ地区について、合同報告書<sup>17)</sup>による被害状況や被害要因との対応について考察する。

#### (1)鹿嶋市

関東地整調査<sup>1)</sup>では図示されていないが、合同報告書では平井地区、鹿島神宮駅周辺で噴砂が多く見られたと記されている。平井地区については、地形分類上、砂丘であるのでそれほど危険度は高くないが（グループ3）、近くのボーリングデータでの $P_L$ 値が高いので、危険度は高くなっている。実際は、砂利採取跡地での液状化である。

鹿島神宮駅周辺は、地形分類ではローム台地となっている。合同報告書によれば、盛土厚5~15mの造成地であり、その盛土が液状化したものである。

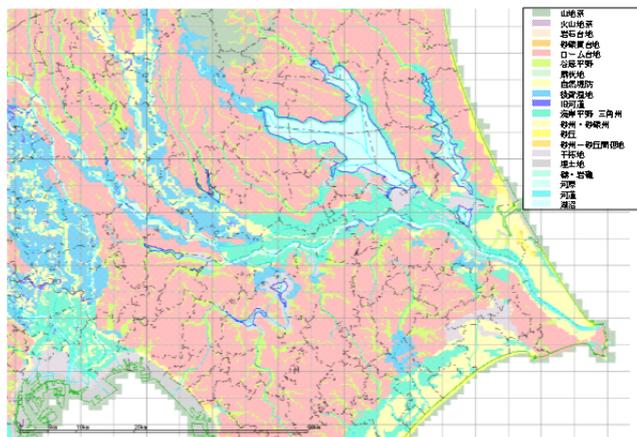


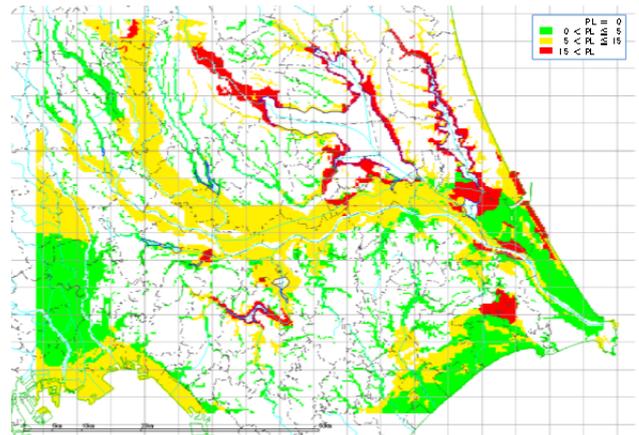
図-4 微地形区分（J-SHISより）

周辺のボーリングデータが乏しかったため、実際の地盤条件を反映できなかったものである。

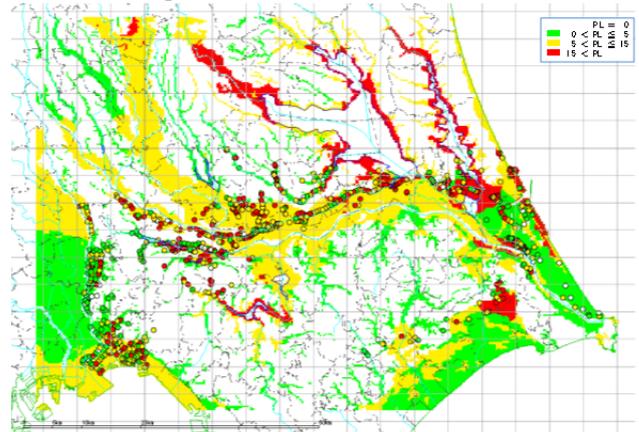
#### (2)神栖市

北西部地区で $P_L>15$ と大きく、液状化も多く確認されている。地形分類は、三角州・海岸低地であり、周辺のボーリングデータで大きな $P_L$ 値となっている。実際は、砂利採取跡地での液状化である。

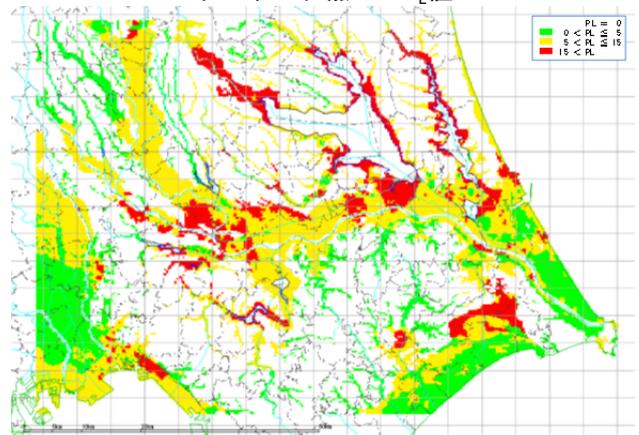
その少し東南の東深芝地区では比較的密にボーリングデータがあり、 $P_L$ 値に変化が見られる。 $P_L > 15$ の地点では液状化が見られており、 $P_L$ 値と液状化発



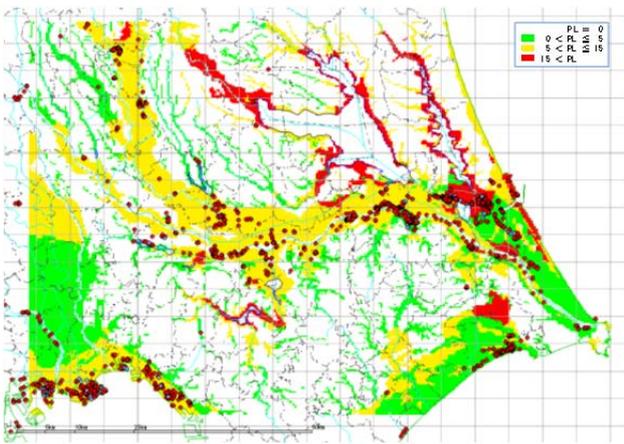
(a)  $P_L$ 値分布（地形分類のみによる）



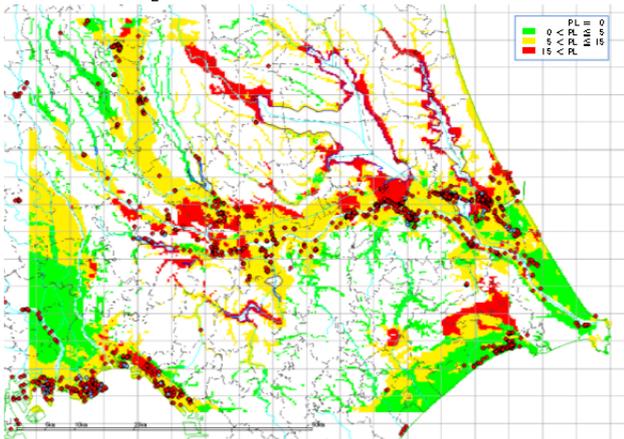
(b)  $P_L$ 値分布（地形分類のみによる）とボーリング点での $P_L$ 値



(c) 統合した $P_L$ 値分布  
図-5 推定した $P_L$ 値分布



(a)  $P_L$ 値分布（地形分類のみによる）



(b) 統合した  $P_L$ 値分布

図-6 推定した  $P_L$ 値分布と液状化地点

生とに相関は見られる。  $P_L < 5$  のエリアでも、少なからず、液状化が確認されている。地形分類では、砂洲・砂礫洲であるので液状化危険度は高くなり、液状化は砂利採取跡地で発生したものである。

(3) 潮来市

多数の液状化が確認された日の出地区で、  $P_L$  値も大きくなっている。地形分類は、三角州・海岸低地と干拓地である。浚渫埋立造成地での連続的に広がっている埋立砂層が広範囲に液状化したものである。ボーリングは、日の出地区内になく、少し北側のデータになっている。

(4) 香取市

小見川地区で多くの液状化が確認されており、  $P_L$  値も15を越えている。地形分類が干拓地でPGVが40cm/s程度であることによる。戦後埋立てられた地点である。

佐原市街地地区では、  $P_L < 5$  と小さい。旧河道の部分でも大きくなっていないのは、PGVが20cm/s強と小さくなっているためと考えられる（周辺にボーリングデータはない）。実際は、かつて水域と湿地であった地点を埋め立てた地点が液状化したものである。

(5) 稲敷市

結佐・六角地区で多数の液状化が確認されており、  $P_L$  値も大きくなっている。この地域もかつて水域と湿地であった地点を埋め立てた地点が液状化したものであり、1987年千葉県東方沖地震の際にも液状化が発生している。

上述のように、概ね液状化が確認された地点では  $P_L$  値も大きくなっている。ボーリングデータが液状化地点周辺では乏しく（液状化後に精力的な調査が行われているが本論文では未反映）、またPGVが40cm/s前後と  $P_L$  値との関係が敏感なエリアでの推定であることを考慮すれば、概ね整合しているものと考えられる。鹿嶋市・神栖市では、砂利採取跡地での液状化が多いが、それらは砂地盤であるので、液状化の可能性のある地域抽出という点では矛盾して

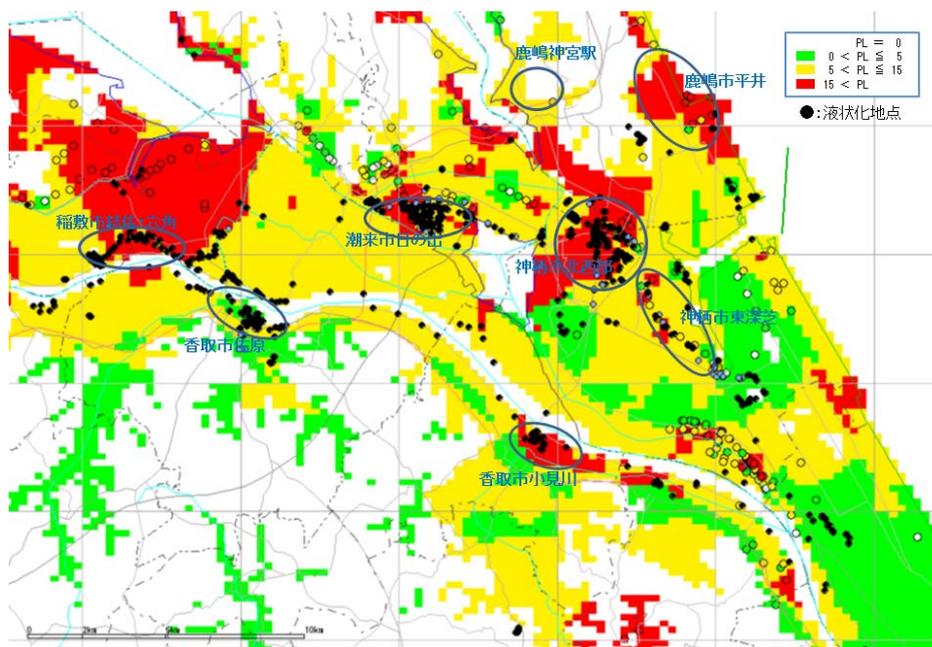


図-7  $P_L$ 値分布と液状化地点（拡大）

いないと見ることもできる。

これより、南の千葉県旭市でも、液状化が多数発生している。 $P_L < 5$ であるにもかかわらず、液状化が生じている点は香取市佐原市街地と同様に、PGVが小さいことによる。実際は、鹿嶋市・神栖市同様に、砂鉄採取跡地で液状化したものである。このような箇所では、PGVが20cm/s強程度でも（地震動も局所的に増幅されている可能性もある）液状化を生じる可能性があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

以上の検討より、以下の知見が得られた。

- 1) 液状化危険度を適切に評価する上では、ボーリングデータが重要である。
- 2) ボーリングデータには粗密があることは避けられないので、地形分類を合わせて用いる統合手法は、広域での液状化危険度分布を推定するためには有効である。
- 3) 2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した場所は、検討手法による液状化危険度が5を超えている地点に多く、概ね本手法の結果は妥当と考えられる。

今後、他地域での展開・データベースの構築に向けては、ボーリングデータの収集が鍵となると考えられる。本論文では、「統合化地下構造データベース」のデータを使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局、(公社)地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 報告書, 2011.
- 2) 浦安市液状化対策技術検討調査委員会：平成23年度浦安市液状化対策技術検討調査報告書, 2012..
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V.耐震設計編, 2012.
- 4) 清水 善久, 石田 栄介, 磯山 龍二, 山崎 文雄, 小金丸 健一, 中山 渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.283-296, 2003.

- 5) 損害保険料率算出機構「地震保険研究15 微地形区分データを用いた広域の液状化発生予測手法に関する研究」, 2008.
- 6) 若松加寿江, 松岡昌志: 地形・地盤分類250m メッシュマップ全国版の構築, 日本地震工学会大会-2008 梗概集, pp.222-223, 2008.
- 7) 防災科学技術研究所 地震ハザードステーション: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 8) 千葉県: 平成23年度東日本大震災千葉県液状化調査報告書概要, 2012.
- 9) 吉田望, 大矢陽介, 澤田純男, 中村晋: 海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性, 日本地震工学会論文集, Vol.9, No.3, pp.28-47, 2003.
- 10) 横浜市: 横浜市地震被害想定調査報告書, 2012.
- 11) 時松孝次, 吉見吉昭: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, 土質工学会論文報告集, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 12) 亀井祐聡, 森本巖, 安田進, 清水善久, 小金丸健一, 石田栄介: 東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響, 地盤工学会論文報告集, Vol.42, No.4, pp.101-110, 2002.
- 13) 童華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, Vol.48, No.11, pp.547-550, 1996.
- 14) 末富岩雄, 石田栄介, 福島康宏, 磯山龍二, 澤田純男: 地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の推定, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第3号, pp.1.-12, 2007.
- 15) 産業技術総合研究所「ジオステーション」, <http://www.geo-stn.bosai.go.jp/jps/index.html>
- 16) 末富岩雄, 福島康宏: 2011年東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)における地震動分布の推定, 土木学会年次学術講演会, 2011.
- 17) 先名重樹, 長谷川信介, 前田宣浩, 藤原広行: 東北地方太平洋沖地震における利根川流域の液状化被害, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第5号, pp.143-162, 2012.
- 18) 東日本大震災合同調査報告書編集委員会: 東日本大震災合同調査報告 共通編3 地盤災害, 2014.

## A CASE-STUDY OF ESTIMATION OF LIQUAFACATION POTENCIAL IN KANTO REGION WITH 2011 OFF THE PACIFFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Tsuneo OHSUMI and Iwao SUETOMI

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake caused liquefaction in broad area of the Kanto region such as the Tokyo Bay coastal area and the Tone River basin. Its characteristic is that many detached houses got damaged by this liquefaction, and now it is the urgent need to take effective measures to liquefaction. This paper proposes the calculation method of liquefaction potential, which combines the method using land classification which mainly applied to broad area and the PL method using borehole data which mainly applied to the limited area. Then this paper checks its validity by comparing the calculated results and actual damage in the Tohoku Earthquake.