

## 広域を対象とした液状化モデルの構築

中部大学大学院 学生会員 川井 望  
中部大学工学部 正会員 山田公夫  
中部大学工学部 正会員 杉井俊夫

### 1. はじめに

水で飽和した砂地盤は、地震動などによる振動や衝撃を受けることにより、まるで泥水のような液体状に変化してしまうことがある。この現象を液状化といい、構造物の重量増加や臨海部の開発、都市の過密化に伴い、今日、地震時において都市機能を揺るがす問題として注目されている。液状化に関する研究は新潟地震(1964, M=7.5)における甚大な液状化被害を契機として、精力的に行われてきた。この成果として現在までにいくつかの液状化予測法が提案されている。

本研究における研究対象地域は、今世紀前半にも発生の懸念がもたれる東海・東南海地震発生域の近傍に位置する名古屋市域である。地震時の地盤の液状化と地形・地質の間には密接な関係があり、液状化が発生しやすい地形は埋立地、現・旧河道、自然堤防などである。名古屋市域は、図-1に示すように市東部に広がる洪積地盤・丘陵地と、西部の沖積地盤に大きく分かれる。また、潜在的に液状化の発生しやすい埋め立て地盤が名古屋港周辺に広がっている。

液状化モデルを構築する上で重要な要素となる液状化エリア・非液状化エリアについて、本研究では東南海地震(1944, M=8.0)を取り上げた。この地震による液状化エリアは、日本の地盤液状化履歴図<sup>1)</sup>や木造家屋被害住家分析図<sup>2)</sup>を用いて調べた。そのエリアは図-1に示した。図-1でピンク色のエリアが液状化、白色のエリアが非液状化である。なお、図-1の名古屋港の様子は現況のものである。一方、地盤情報等については最新名古屋地盤図<sup>3)</sup>や土地条件図<sup>4)</sup>を利用した。

液状化予測手法は力学的手法と統計的手法に大別され、現在行われている予測法は、大きく次の4種類に分けることができる。

- 地形・地質や液状化履歴をもとにした概略の予測法
- 一般の土質調査・試験結果を基にした簡易な予測法
- 室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な予測法
- 模型振動台実験や原位置液状化試験

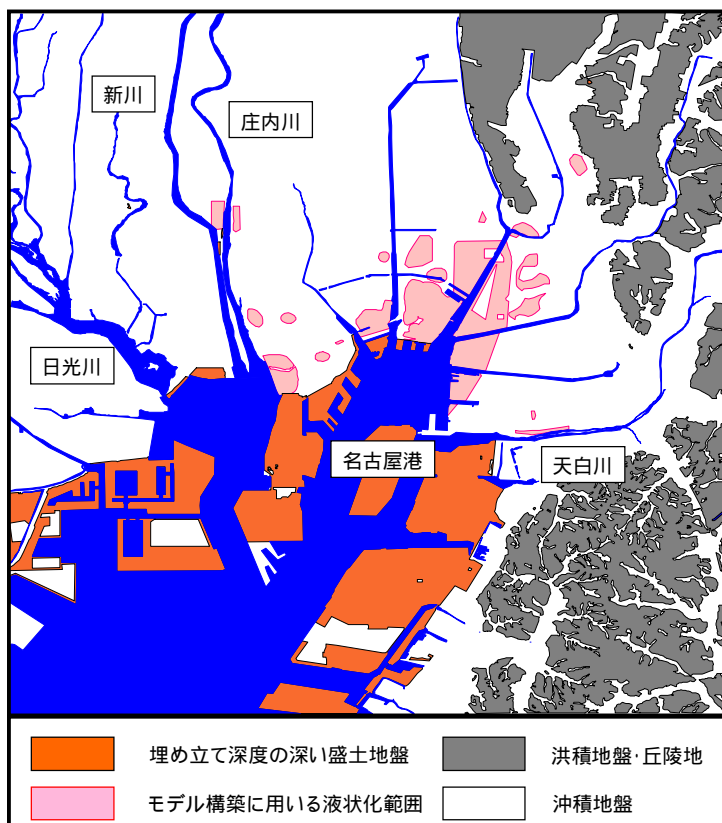


図-1 研究対象地域の地形概要

Construction of Liquefaction potential model for wide area.

Nozomu KAWAI (tc08002-3195@sti.chubu.ac.jp), Kimio YAMADA & Tosio SUGII (Chubu University)

詳細な力学的手法は対象地盤に対して原位置・室内試験が必要であり、どのような場合にも適用できる汎用性は高いが、広域を対象とした液状化予測を行う場合は、調査や試験にかかる時間と経費は膨大なものとなる。一方、統計的手法は既往地震による液状化調査結果をもとに、液状化発生に関するいくつかの要因を用いて液状化発生の判別モデルを作成する方法である。この判別モデルを構築するには液状化範囲の特定と要因分析の正確性・妥当性が求められ、判別精度の良い分析モデルを得ることは容易ではない。

本研究は、多変量解析法の1つである数量化理論 類を用い、分析に用いる目的変数を既往地震における液状化発生の有無とし、説明変数に土地条件図をもとにした地形分類、最新名古屋地盤図をもとにした地盤情報、さらに地盤情報をもとにした当該地域の地盤応答解析を行った結果を用いて液状化モデルの構築を試みた。最新名古屋地盤図より解析に用いるボーリングデータを選定し、液状化地点として60地点、非液状化地点として149地点を分析対象とした。このように液状化発生に影響する定性的・定量的な要因を抽出し、広範囲な見地から要因分析を行い、液状化の一次判定である危険度マップの作成に利用できる液状化判別モデルの構築を目指した。

## 2. モデル構築に用いた要因

過去の震害事例の分析によって震害予測モデルを得ようとする場合、用いる要因は分析対象地域と予測対象地域において共通に取り上げることができるものでなければならない。すなわち、分析対象地域で用いられた要因が予測対象地域で調査できない要因であると、分析で得られたモデルを予測モデルとして適用できないことになる。本研究では分析対象と予測対象地域をいずれも名古屋市域としているが、他地域への適用を考慮して、一般的に調査可能な要因を選ぶこととした。

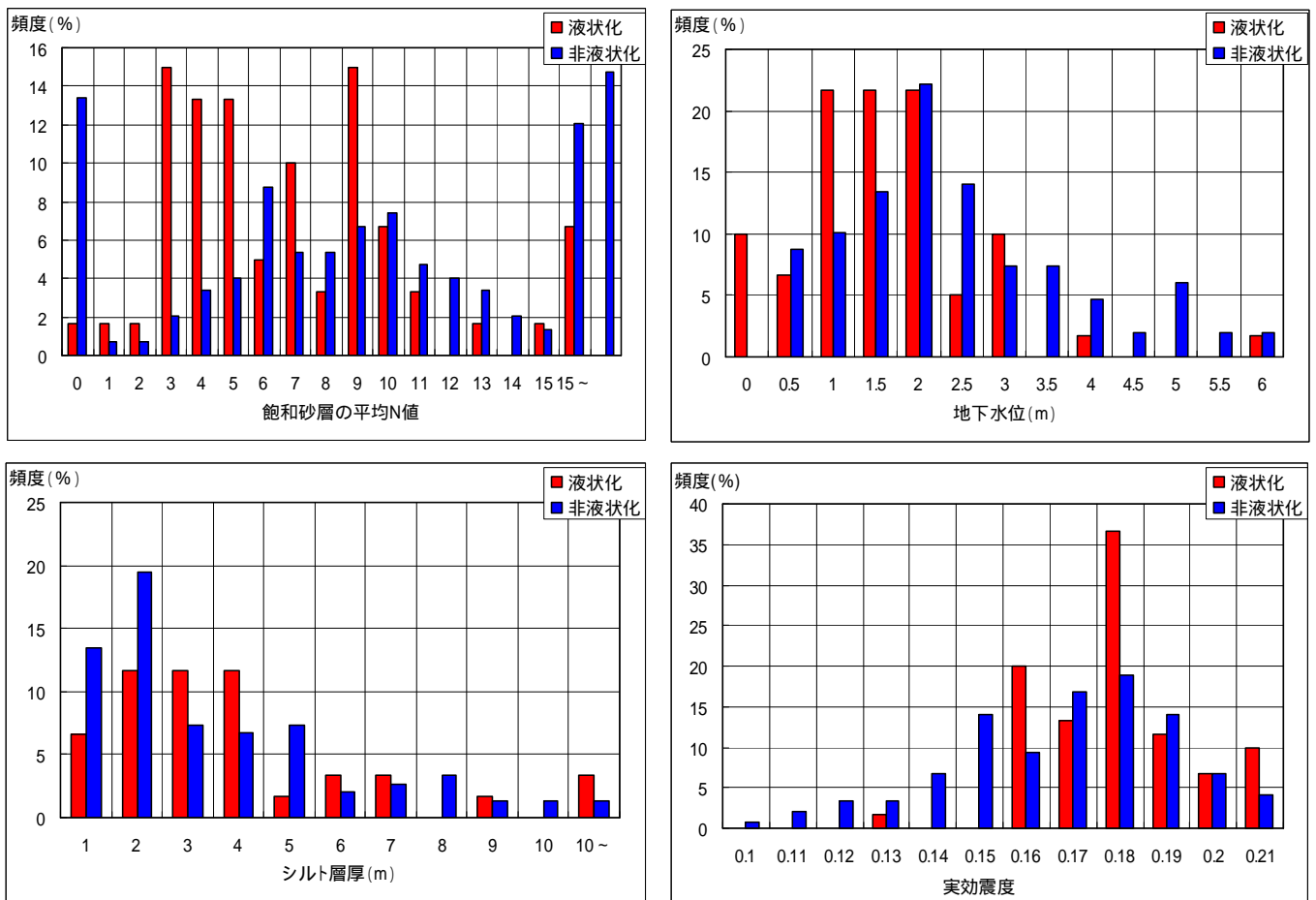


図 - 2 各要因の液状化に関する頻度分布

本研究では液状化に影響する要因として沖積層厚、地下水位の深さ、地盤の平均N値、飽和砂層の平均N値、飽和砂層厚、シルト・粘土層厚、連続最大飽和砂層厚、連続最大シルト・粘土層厚、土質の堆積パターン、地形、震度を用いた。

これらの要因において定量的要因に対するカテゴリー区分は非常に多く考えられる。そのため、これらの要因についてはカテゴリー間に液状化発生頻度の差があり、扱いやすい区分になることを配慮し、カテゴリー区分を幾通りも変えて、数多く試行を繰り返して分析を行った。また、定量的要因に対するカテゴリー区分を行う際には、図-2に示すような頻度分布図を作成し要因ごとの液状化・非液状化別の分布傾向を検討した。

図-3は、図-1に示した液状化エリアにおいて、沖積層に占める飽和砂層厚の割合とシルト・粘土層合計厚を散布図に表したものである。これら2つの要因の間にはある一定の関連性が見られるため、分析に同時に用いるのは好ましくない。このように要因間の関連性も考慮して分析を行った。

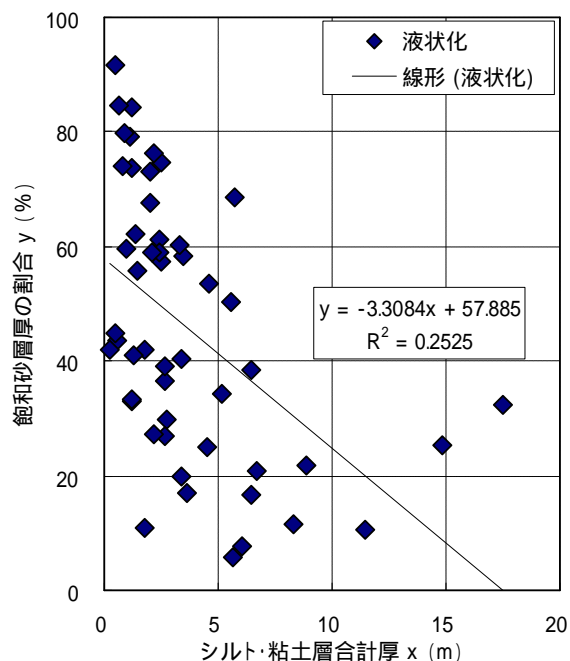


図-3 飽和砂層厚の割合とシルト・粘土層合計厚の比較

### 3. 想定東南海地震による名古屋市域の実効震度分布

本研究のような地震に関する分析において地震の強さは無視できない要因のひとつである。この要因を決定するに当たって、地盤の地震応答解析プログラムのSHAKE<sup>5)</sup>を用いて、名古屋市域において地区単位の詳細な応答解析を行って、地表最大加速度  $\alpha_{max}$  と地盤の卓越振動数  $f$  を求めた。山田は地震の強さの指標である震度を地盤の周期特性を考慮して推定する経験式を提案した<sup>6)</sup>。沖積層に対する提案式を以下に示す。

$$k_e = 0.0115(\alpha_{max}/f)^{0.488} \dots \dots (1)$$

$$k_e = 0.0579(\alpha_{max}/f^2)^{0.200} \dots \dots (2)$$

ここで、 $\alpha_{max}$  は地表最大加速度、 $f$  は地盤の卓越振動数であり、 $k_e$  を実効震度と呼ぶ。また、 $(\alpha_{max}/f)$  は速度の単位、 $(\alpha_{max}/f^2)$  は変位の単位を持つが、ともに地震動の速度と変位を直接表す量ではないので、それぞれを擬似速度、擬似変位と呼ぶ。このように実効震度  $k_e$  は速度または変位に関連付けて決定される。この実効震度は静的耐震設計などで用いられる設計震度に相当するもので、震度階と区別して工学的震度階と呼ばれる。

東南海地震(1994, M=8.0)の想定震源域<sup>7)</sup>のもとで行った応答解析結果より、式(1)、

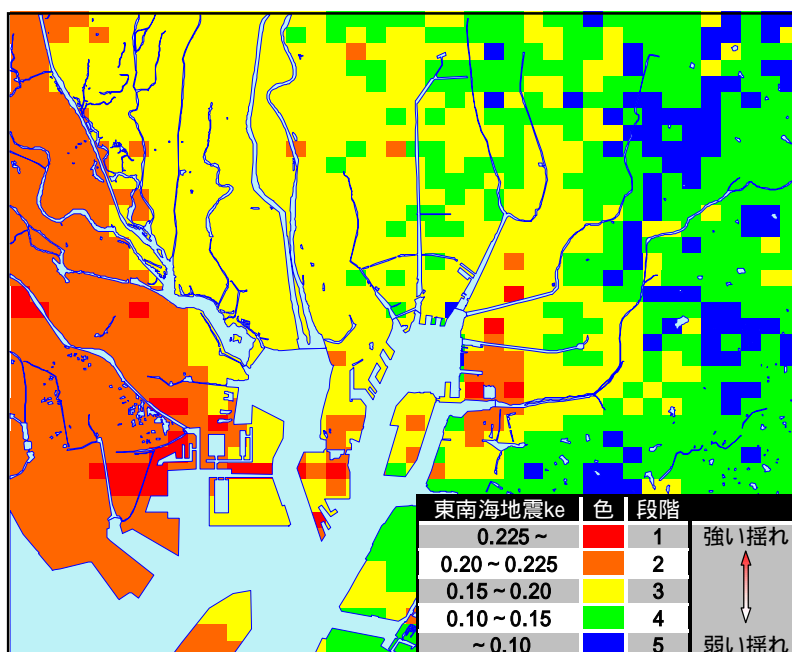


図-4 名古屋市の実効震度分布図(500m x 500m メッシュ)

(2)を用いて実効震度  $k_e$  を算出した。この際、実効震度は安全側に見積もるために、式(1)、(2)で求めた値の大きい方を採用した。図 - 4 に 500m 四方メッシュ単位で示した名古屋市域の実効震度の分布を示す。なお、地盤資料が入手できず、地盤応答解析を行うことができないメッシュに対しては、応答解析を行ったメッシュの値をもとに、データ補完計算によって実効震度  $k_e$  の推定を行った。図 - 4 からわかるように、名古屋市の南西部の臨海部や河川周辺地区で 0.225 以上のスコアをマークし、危険度が高い。逆に、市中央部・東部の台地・丘陵地では実効震度の値が小さくなっており、震度分布と名古屋市域における地盤特性とが合致していることがわかる。以上のようにして求めた実効震度  $k_e$  は、液状化モデルを構築するための要因として付け加えた。

#### 4. 数量化理論 類による液状化発生モデル

数量化理論 類は、判別分析とよく似た分析方法である。判別分析では説明変数を定量的要因で表すのに対し、数量化理論 類では、説明変数を定性的要因で表して分析を行う。

一方、目的変数は、判別分析・数量化理論 類ともに定性的要因として扱っている。分析を行う際に各個体が持っている様々な要因を数値として置き換え、さらにその個体がどの群(グループ)に属するかを判別する手法が数量化理論 類である。

前述したように、分析に用いる説明変数間の関連の強さを考慮して要因選択を行い、種々の組み合わせで分析を行った。その結果、

表 - 1 に示した 5 要因を用いたモデルが液状化・非液状化の判別の中率が最も高くなった。要因分析で得られた各要因のカテゴリースコアダイアグラムを図 - 5 に示した。表 - 1、図 - 5 のカテゴリースコアは各要因のカテゴリースコアからその要因のカテゴリースコアの平均値を差し引いたもので、正の場合ならそのカテゴリースコアが液状化の発生を誘発させる方向に、逆に負の場合ならば液状化を抑制させる方向に働くことを示している。よって、表 - 1 や図 5 の各要因のカテゴリースコアからわかるように、飽和砂層の平均 N 値はそ

表 - 1 数量化理論 類による分析結果

要因名	カテゴリ区分	該当数	カテゴリスコア	レンジ	順位
飽和砂層の平均N値	N < 5	64	0.5260	0.8184	2位
	5 N < 10	74	-0.2270		
	10 N	49	-0.2924		
	その他	22	-0.1153		
地下水位の深さ(m)	W < 1.5	84	0.1953	0.6186	4位
	1.5 W < 3	87	-0.0037		
	3 W	38	-0.4233		
シルト層厚(m)	Z = 0	77	0.1858	0.5424	5位
	0 < Z < 5	107	-0.0504		
	5 Z	25	-0.3566		
実効震度	ke < 0.15	46	-0.5076	0.6844	3位
	0.15 ke < 0.2	151	0.1406		
	0.2 ke	12	0.1768		
地形3分類	干拓地・埋立地	59	0.9382	1.6086	1位
	河川周辺	41	0.4322		
	その他	109	-0.6704		

飽和砂層の平均 N 値における【その他】は飽和砂層なしを示す。

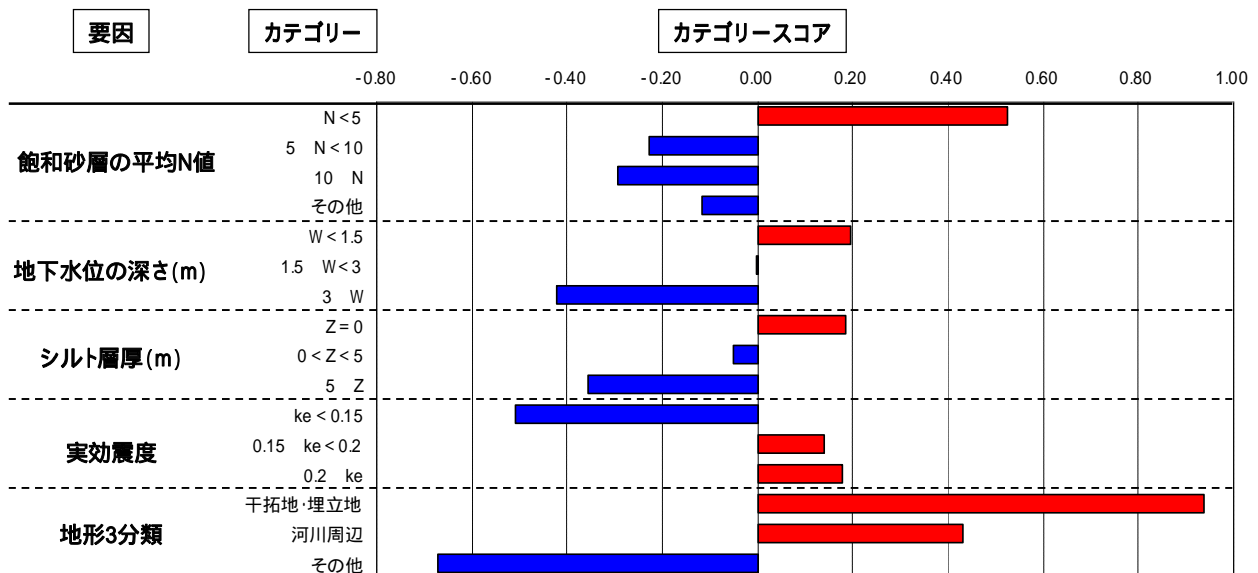


図 - 5 分析モデルのカテゴリースコアダイアグラム

の値が大きいほど、地下水位の深さは浅いほど、シルト層厚は薄いほど、実効震度はその値が大きいほど液状化が発生しやすいという結果が得られた。また、定性的要因である地形分類では干拓地・埋立地ならびに河川周辺が、これら以外の地区と比べて、顕著に液状化が発生しやすいという結果となった。以上のことより、本モデルにおける各要因のカテゴリースコアは、液状化・非液状化を工学的に矛盾なく説明できるものとなっている。

表 - 1 のモデルによる判別スコアのヒストグラムと液状化発生・非発生の判別区分点 ( $Z_0=0.51$ ) を図 - 6 に示す。数量化理論 類を用いて分析モデルを構築する際、液状化の発生・非発生のそれぞれのヒストグラムが左右にはっきりと分離していれば目的事象の判別が精確になされる。表のモデルを用いて液状化の判定を行う場合、対象地点において飽和砂層の平均  $N$  値、地下水位の深さ、シルト層厚、実効震度、地形分類の 5 要因を調べ、各要因に該当するカテゴリースコアを加えることによって判別スコア  $Z$  が得られる。なおこの判別スコア  $Z$  が図 - 6 に示す判別区分点  $Z_0$  を超える場合には液状化発生、超えない場合には液状化非発生であると判別される。

分析対象とした合計 209 地点に対して表 - 1 の分析モデルを再現した結果を表 - 2 に示す。東南海地震において液状化が発生したとする 60 地点のうち 51 地点は液状化発生と判別されるが、9 地点は液状化非発生と判別され誤判別となっている。また逆に、東南海地震において液状化が発生しなかったとされる 149 地点のうち 124 地点は液状化非発生と判別されるが、25 地点は液状化発生と判別され誤判別となった。このように合計 209 地点中 175 地点で実地震時の液状化履歴とモデルによる判別結果が一致しており、分析モデルの判別の中率は 83.7% となった。また、相関比は 0.44 となった。これらの結果より、表 - 1 のモデルは分析対象地域の液状化モデルとして、液状化危険度マップの作成に利用可能と考える。

表 - 2 再現結果

		モデル再現時		
		液状化	非液状化	合計
実地震時	液状化	51	9	60
	非液状化	25	124	149
	合計	76	133	209

判別の中率	83.7%
判別の中点	0.5125
相関比	0.4370

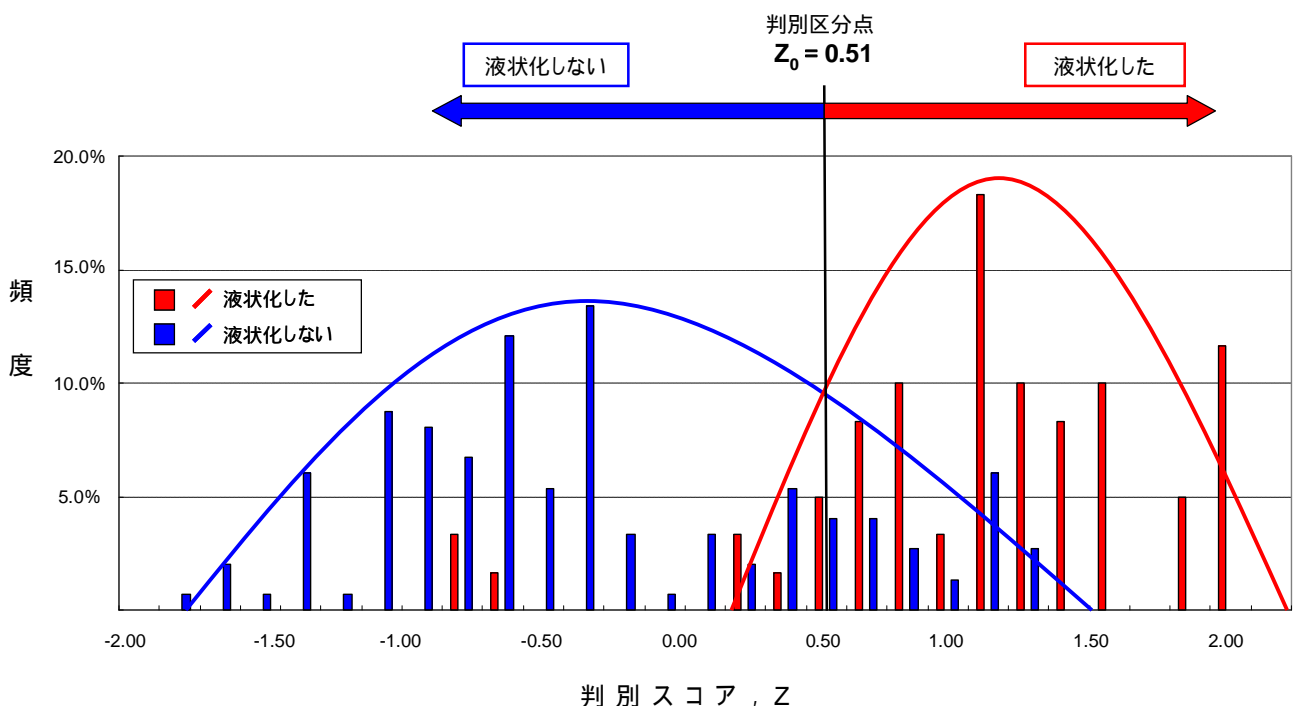


図 - 6 判別スコアの頻度分布と判別区分点

分析によって得た液状化モデルを対象地域である名古屋市域に再現した結果を図 - 7 に示した。東南海地震で液状化が発生したと考えられる範囲で、非液状化と誤判別された箇所は河川沿いに多く見られる。一方、非液状化範囲では液状化と誤判別された箇所が点在している。

## 5. おわりに

広域を対象とした液状化モデルの構築を目指し、東南海地震時の名古屋市域における液状化の要因分析を行い、再現性の良好なモデルを構築した。このモデルで液状化予測を行えば、高コストの液状化調査を行う前準備調査(一次判定)として耐震設計や地震防災に役立つものとする。他地域における本モデルの適用についてはさらなる検討が必要であるが、広域を対象とした液状化発生モデルのひとつとしての提案ができたと考える。以下に本研究で得られた結果を述べる。

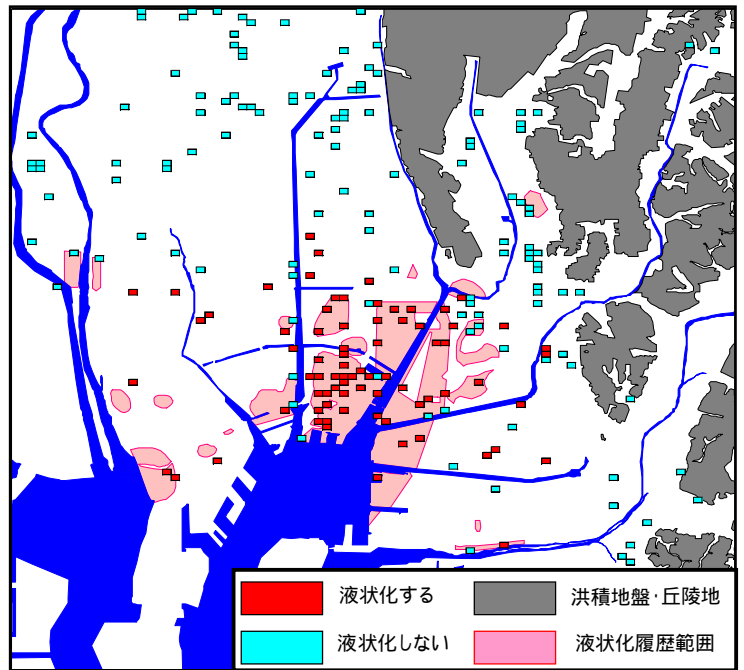


図 - 7 分析対象地区への液状化モデルの再現

- (1) 数量化理論 類を用いて、種々の要因を組み合わせ分析を行った結果、飽和砂層の平均 N 値、地下水位の深さ、シルト層厚、実効震度、地形分類の 5 要因を用いたモデルが液状化発生・非発生の判別率的中率が最も高くなった。この中で最も影響力が大きかった要因は地形分類であり、次いで飽和砂層の平均 N 値、実効震度となった。
- (2) 構築したモデルのレンジは最小のものがシルト層厚の 0.542 であり、最大のものが地形分類の 1.61 であった。この 2 つの要因間におけるレンジの差は 1.07 であり、若干の影響差はあるものの地形分類を除いた 4 要因のレンジはおおよそ同程度のものであった。
- (3) 本研究で構築した液状化モデルに用いられている各要因は、液状化・非液状化を工学的に矛盾なく説明することができた。また、実地震時の液状化履歴とモデル再現時の液状化発生・非発生の整合性はおよそ 8 割の確率で的中した。したがって、研究対象地域において詳細な液状化調査の重点をどの地区に置くかを定めるための一次判定には実用上十分利用できるものとする。

## 参考文献

- 1) 若松加寿江：日本の液状化履歴図、東海大学出版会、1991
- 2) 井関弘太郎：昭和 19 年 12 月 7 日東南海地震による被害住家の分布と地盤条件、名古屋市防災会議(地震対策専門委員会)、1978
- 3) 土質工学会中部支部：最新名古屋地盤図、名古屋地盤図出版会、1988
- 4) 建設省国土地理院：1:25000 土地条件図「名古屋南部」「名古屋北部」
- 5) Schnabel, P.B., Lysmer J. and Seed H.B. : SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site, EERC Report, Univ. of California, Barkly, 1972
- 6) 山田公夫：中部大学工学部紀要、Vol.25、pp.75-84、1989
- 7) 石橋克彦：東海地方に予想される大地震の再検討、地震予知連絡会会報、17 巻 4 号、pp.126-132、1976