共分散構造分析とサポートベクターマシン による液状化発生地点の予測

柳瀬 匡雄1・丸山 喜久2

1学生会員 千葉大学大学院融合理工学府 博士前期課程 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33) E-mail: adya2064@chiba-u.jp

²正会員 千葉大学大学院工学研究院 准教授(〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33) E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

本研究では若松・先名(2015)がとりまとめた東北地方太平洋沖地震における液状化発生地点データを 利用し、千葉県内の液状化発生地点と地震動強さ、地形的特徴の因果関係を共分散構造分析とサポートベ クターマシン(SVM)による分析を用いて評価した.本研究の液状化発生の予測結果は、既往研究よりも 精度が高かった.また、構築した液状化発生の判別モデルを、東北地方太平洋沖地震の際の他地域のデー タセットに適用し、モデルの汎用性を評価した.さらに、別の地震への適用性を評価するために、2016年 熊本地震の液状化発生地点データを利用し、液状化発生地点の予測精度を検証した.

Key Words : soil liquefaction, covariance structure analysis, support vector machine, 2011 Tohoku earthquake, 2016 Kumamoto earthquake

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、青森県から神奈川 県までのおよそ南北650kmの広域な範囲で液状化が発生 した^b. 液状化は、建物、橋梁などの様々な構造物やラ イフライン施設等に甚大な被害を与えることがある.ま た地震調査委員会では、今後30年間でマグニチュード7 クラスの地震が首都圏で起こる確率を70%と評価してお り^a、首都圏の液状化対策は一層重要である.このこと から、将来起こりうる地震に対して液状化が発生する危 険がある地点を予測し、対策を講じておくことは意義が あるものと考えられる.

関東地方は大河川の沖積作用による低地や埋立地の面 積が多いため、東北地方太平洋沖地震では液状化が多数 発生した.一方、東北地方は津波の襲来によって液状化 の痕跡が消えてしまったこともあるが、概して海岸近く まで山地・丘陵が迫っているため、液状化による被害が 少なかった.このように液状化の発生には、地形的特徴 の違いが大きく影響したものと考えられる^b.

そこで本研究では、まず複数の構成概念間の関係を検 討できる統計的手法の一つである共分散構造分析 (Covariance Structure Analysis)³を行い、どの素因が液状化発 生に大きく影響するのかを明らかにする.さらに、教師 あり学習に基づくパターン認識手法の一つであるサポー トベクターマシン(Support vector machine)⁴ を用いて,比較 的少数の説明変数で液状化発生地点を予測する手法を構 築することを目的とする.

本研究では、まず東北地方太平洋沖地震の際の千葉県 での液状化発生地点を対象に分析を行った.使用したデ ータ(**表**-1)は国土交通省が整備する国土数値情報⁹と 微地形区分⁹である.前者は標高,傾斜角などの地形デ ータが5次メッシュ(約250mメッシュ)ごとに整備され ている.後者には微地形が5次メッシュごとに格納され ている.後者には微地形が5次メッシュごとに格納され ている.本研究で用いる地形的特徴データは、標高(**図** -1),傾斜方向,最大傾斜角,起伏量(標高の最大値と 最小値の差),微地形区分,河川からの距離とし,さら に東北地方太平洋沖地震における計測震度⁷を地震動指 標に用いた.これらの説明変数の選定は、松岡ら⁸によ る液状化危険度の推定手法を参考にした.

東北地方太平洋沖地震による液状化発生地点は,若松ら¹がとりまとめたデータを用いた.液状化発生地点が5次メッシュごとに格納されていたため,解析のメッシュ サイズを5次メッシュとした.本研究では,東北地方太 平洋沖地震の千葉県での液状化発生状況に基づき,液状 化発生地点の予測モデルを構築する.さらに,同地震に おける他地域(茨城県南部)での液状化発生予測,別の 地震(2016年熊本地震)の際の液状化発生予測を行い, モデルの適用性を評価する.なお,本研究で使用した

| - | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------|-----------|--------|---------|----------|-----------|--------|-----|------------|-------|--------|
| | 観測変数 | 頻度 | 液状化発生数 | | 観測変数 | 頻度 | 液状化発生数 | | 観測変数 | 頻度 | 液状化発生数 |
| | 以上~未満(m) | メッシュ数 | 液状化発生数 | | | メッシュ数 | 液状化発生数 | | 以上~未満(m) | メッシュ数 | 液状化発生数 |
| | 0~50 | 57583 | 3701 | | その他 | 14 | 0 | 起 | 0~50 | 64179 | 3701 |
| | 50~100 | 11293 | 1 | | 山地 | 5016 | 0 | († | 50~100 | 12920 | 1 |
| 梗 | 100~150 | 5673 | 0 | | 山麓地 | 867 | 0 | | 100~150 | 2501 | 0 |
| | 150~200 | 3002 | 0 | | 丘陵 | 1 4 2 1 5 | 1 | 重 | 150~200 | 94 | 0 |
| 同 | 200~250 | 1508 | 0 | | 火山地 | 0 | 0 | | 200~250 | 1 | 0 |
| | 250~300 | 547 | 0 | | 火山山麓地 | 0 | 0 | | 以上~未満(m) | メッシュ数 | 液状化発生数 |
| | 300~350 | 83 | 0 | | 火山性丘陵 | 0 | 0 | \ | 0~500 | 57081 | 2644 |
| | 350~400 | 6 | 0 | | 岩石台地 | 32 | 0 | 氾 | 500~1000 | 15834 | 745 |
| | 平坦 | 331 | 96 | | 砂礫質台地 | 7013 | 4 | Ш | 1000~1500 | 4966 | 225 |
| | 北 | 8187 | 438 | | ローム台地 | 25848 | 661 | th | 1500~2000 | 1420 | 76 |
| 傾 | 北東 | 9656 | 403 | 微 | 谷底低地 | 5605 | 172 | 10. | 2000~2500 | 351 | 11 |
| 斜 | 東 | 10755 | 412 | ++h | 扇状地 | 89 | 0 | 5 | 2500~3000 | 36 | 1 |
| + | 南東 | 11168 | 540 | - 년 - 년 | 自然堤防 | 584 | 94 | ெ | 3000~3500 | 2 | 0 |
| 12 | 南 | 8326 | 403 | 形 | 後背湿地 | 2922 | 87 | | 3500~4000 | 0 | 0 |
| 向 | 南西 | 10173 | 489 | | 旧河道 | 776 | 264 | 昛 | 4000~4500 | 0 | 0 |
| | 西 | 1 0 9 0 5 | 377 | | 三角州·海岸低地 | 4433 | 948 | 離 | 4500~5000 | 0 | 0 |
| | 北西 | 10194 | 544 | | 砂州・砂礫州 | 5551 | 211 | | 5000~5500 | 0 | 0 |
| | 以上~未満(゜) | メッシュ数 | 液状化発生数 | | 砂丘 | 421 | 37 | | 5500~6000 | 5 | 0 |
| | 0~5 | 35776 | 3231 | | 砂州·砂丘間低地 | 1748 | 50 | - | 4 | 27474 | 3 |
| | 5~10 | 12368 | 351 | | 干拓地 | 1544 | 210 | 闤 | 555 | 24074 | 278 |
| | 10~15 | 10265 | 92 | | 埋立地 | 2551 | 911 | 度 | 5強 | 23705 | 3025 |
| 傾 | 15~20 | 7459 | 18 | | 磔·岩礁 | 62 | 0 | | 655 | 4442 | 396 |
| 全北 | 20~25 | 5722 | 10 | | 河原 | 291 | 50 | | | | |
| 小 一 一 一 | 25~30 | 4503 | 0 | | 河道 | 58 | 0 | | | | |
|) 円 | 30~35 | 2695 | 0 | | 湖沼 | 55 | 2 | | | | |
| | 35~40 | 823 | 0 | | | | | | | | |
| | 40~45 | 76 | 0 | | | | | | | | |
| | 45~50 | 6 | 0 | | | | | | = + | 79695 | 3702 |
| 1 | EQ. FE | | | | | | | | | 19090 | 3702 |

表-1 カテゴリごとのメッシュ数



千葉県のメッシュ総数は79695メッシュであり、そのうち3702メッシュが液状化発生地点である(図-2).

2. 共分散構造分析に基づく液状化発生確率

まず,共分散構造分析に基づき,液状化に大きく影響する説明変数を表-1の中から選択する.共分散構造分析では,誘因が各素因に影響し液状化を引き起こすものと仮定する.さらに,素因をいくつかの要因にまとめることができるものとして,要因と液状化発生確率との相関を求める.まず,誘因には東北地方太平洋沖地震の際



の計測震度を用いた.素因には,標高,傾斜方向,傾斜角,起伏量,微地形区分,河川からの距離を用いた.共分散構造分析では,直接観測できる変数(観測変数)に加えて,内容の似通った観測変数をまとめて構成概念を表現する潜在変数を扱うことができる.液状化発生を表すパス図の基本モデルの構造は,既往研究®を参考に仮定した(図-3).共分散構造分析にあたり,メッシュごとの液状化発生確率 S_q をベイジアンモデルにより求める¹⁰.メッシュqにおいて液状化が発生すると想定される事象を $\{T_q\}$ とし, $P\{T_q\}$ はその確率を表す.メッシュqに該当する「*i*番目の素因における*j*番目のカテゴリ」を c_{ij} (*i*=1,…*m*, *j*=1,…*n*)と記述する.例えば,あるメッシ



図-3 本研究で仮定した液状化発生の基本モデル

ュの1番目の素因である標高の値が180 mであれば,表-1 から当該メッシュのカテゴリは4番目となるためc₁₄と表 記する.

ベイズの定理に従うと、液状化発生確率 S_q は以下のように記述できる.

$$S_q = \frac{P\{T_q\} \cdot P\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj} | T_q\}}{P\{c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{mj}\}}$$
(1)

ここで、各素因が独立事象であると仮定すると,

$$P\{c_{1j}, c_{2j} \dots, c_{mj} | T_q\} = P\{c_{1j} | T_q\} \dots P\{c_{mj} | T_q\} \quad (2)$$

となり、式(2)を式(1)に代入すると、

$$S_{q} = \frac{P\{c_{1j}\}...P\{c_{mj}\}}{P\{c_{1j},c_{2j},...,c_{mj}\}} \cdot P\{T_{q}\} \cdot \frac{P\{T_{q}|c_{1j}\}}{P\{T_{q}\}} ... \frac{P\{T_{q}|c_{mj}\}}{P\{T_{q}\}}$$
(3)

となる. ここで, 式(3)を計算するためには,

$$P\{c_{ij}\} = \frac{N_{ij}}{A} \tag{4}$$

$$P\{c_{1j}, \dots, c_{mj}\} = \frac{N_X}{A} \tag{5}$$

$$P\{T_q\} = \frac{N_0}{A} \tag{6}$$

$$P\{T_q | c_{ij}\} = \frac{N_{d_{ij}}}{N_{ij}} \tag{7}$$

を式(3)にそれぞれ代入すればよい.ここで、N_{ij}はi番 目の素因におけるカテゴリjのメッシュ数、Aは全メッ シュ数、N_xはメッシュqにおけるi~m番目の素因に対 する全カテゴリにおいて等しい属性のメッシュ数、N₀ は液状化発生のメッシュ数、N_dはi番目の素因における カテゴリjの領域に属する液状化発生のメッシュ数であ る.共分散構造分析に基づき、液状化の発生を相関の高 い要因を評価する.なお、ここでは液状化を引き起こす

表-2 パスモデルの適合度指標

| モデル名 | 削除した要因 | RMSEA | CFI | ТЦ |
|--------------------|----------|-------|-------|--------|
| モデル1 | - | 0.15 | 0.868 | 0.754 |
| モデル2 | 標高 | 0.149 | 0.869 | 0.725 |
| モデル3 | 傾斜方向 | 0.127 | 0.912 | 0.815 |
| モデル4 | 傾斜角 | 0.194 | 0.781 | 0.54 |
| モデル5 | 起伏量 | 0.152 | 0.875 | 0.737 |
| モデル6 | 微地形 | 0.219 | 0.795 | 0.57 |
| モデル7 | 距離 | 0.191 | 0.853 | 0.692 |
| モデル8 | 震度 | 0.095 | 0.968 | 0.916 |
| モデル9 | 標高+傾斜方向 | 0.3 | 0.746 | 0.365 |
| <u>モデル10</u> | 標高+傾斜角 | 0.211 | 0.705 | 0.263 |
| モデル11 | 標高+起伏量 | 0.169 | 0.864 | 0.659 |
| モデル12 | 標高+微地形 | 0.264 | 0.726 | 0.316 |
| モデル13 | 標高+距離 | 0.201 | 0.85 | 0.624 |
| <mark>モデル14</mark> | 標高+震度 | 0.021 | 0.999 | 0.995 |
| <u>モデル15</u> | 傾斜方向+傾斜角 | 0.426 | 0.573 | -0.067 |
| <u>モデル16</u> | 傾斜方向+起伏量 | 0.305 | 0.752 | 0.38 |
| <u>モデル17</u> | 傾斜方向+微地形 | 0.339 | 0.771 | 0.426 |
| <u>モデル18</u> | 傾斜方向+距離 | 0.361 | 0.749 | 0.372 |
| <u>モデル19</u> | 傾斜方向+震度 | 0.092 | 0.969 | 0.928 |
| <u>モデル20</u> | 傾斜角+起伏量 | 0.213 | 0.739 | 0.348 |
| <u>モデル21</u> | 傾斜角+微地形 | 0.363 | 0.603 | 0.008 |
| モデル22 | 傾斜角+距離 | 0.239 | 0.754 | 0.53 |
| モデル23 | 傾斜角+震度 | 0.037 | 0.996 | 0.985 |
| モデル24 | 起伏量+微地形 | 0.259 | 0.751 | 0.378 |
| モデル25 | 起伏量+距離 | 0.206 | 0.855 | 0.639 |
| モデル26 | 起伏量+震度 | 0.026 | 0.998 | 0.993 |
| <u>モデル27</u> | 微地形+距離 | 0.309 | 0.763 | 0.492 |
| モデル28 | 微地形+震度 | 0.04 | 0.997 | 0.989 |
| モデル29 | 距離+震度 | 0.131 | 0.97 | 0.886 |

因果の強さを評価することを目的とし、標準化解を算出 するために、観測変数は平均0、標準偏差1に標準化した^{ID}.

まず、図-3の基本パスモデルの適合度を算出する. さらに、基本モデルから観測変数を1~2個減らしたモデルの適合度を評価し、最適なパスモデルを探索した. 結果を表-2にまとめる. RMSEAは共分散構造分析において頻繁に利用されている適合度指標であり、0以上の値をとり、値が小さいほどモデルの適合が良いとされる. 一般にRMSEAは0に近いほど適合が良いモデルとされ、0.08以下でモデルが採択される¹⁰. CFIとTLIは、独立モデルと解析されたモデルの適合度(カイ自乗値)を比較したモデルである. 独立モデルとは、あるデータの分析をする場合に、想定し得る中で最も適合の悪いモデルのことである. これらは、1に近いほど適合が良いと判断される¹³.

表-2の結果から,基本モデル(モデル1)の適合度は 比較的良好である.また,誘因である計測震度を除いた モデル8,14,26の適合度も高い.これは,千葉県内で 液状化が発生した地点の約80%が震度5強であり,使用 したデータ内の計測震度に大きな差がなかったことが影 響していると考えられる.



図-4 採用した6ケースのパスモデル



図-5 液状化発生確率の累積頻度分布と的中率

計測震度を残したモデルの中では、モデル4,13の適 合度が高かった.したがって、基本モデルに加えてこれ らの5つのモデルについて詳細な検討を行う.

図-4に基本モデルとこれらの5つのモデルのパス図と パス係数(相関係数)を示す.それぞれのパスモデルの 相関係数から,液状化発生には要因2(微地形区分)が 最も大きく影響しており,次いで要因1の影響が大きか った.また,要因1の中では傾斜角の相関係数が最も大 きかった.一方,要因3(河川からの距離)の影響は小 さかった.

図-4の結果をもとに液状化発生地点を推定し、その的中率を評価する.具体的には、横軸にパスモデルをもとに算出した液状化発生確率を、縦軸にその度数および累積頻度を示す¹⁰.さらに、負極側から液状化発生地点の累積頻度曲線を、正極側から非液状化地点の累積頻度曲線を描く(図-5).つまり、液状化発生地点をA グループ、非液状化発生地点をBグループとすると、

$$F_A(X) = 1 - \int_{-\infty}^X f_A(x) dx$$
 $(\int_{-\infty}^{+\infty} f_A(x) dx = 1)$ (8)

$$F_{\rm B}(X) = \int_{-\infty}^{X} f_B(x) dx \qquad \left(\int_{-\infty}^{+\infty} f_B(x) dx = 1\right) \tag{9}$$

となり,累積度数分布 $F_A(X)$, $F_B(X)$ の交点が判別の閾値 aとなる[¬]. すなわち,液状化発生の危険がある領域は $X \ge a$,液状化発生の危険がない領域はX < aとなり, 的中率は式(10)のようになる¹⁰.

$$P = 1 - F_i(a)$$
 (*I*=A, B) (10)

各モデルの的中率を図-6 に示す. なお,前述のよう に標準化解を算出することを目的とし,図-6の横軸 (液状化発生確率 S_q :式(1))は標準化している.この 結果,基本モデルの的中率が最も高く的中率は 79.7%と なった.

3. サポートベクターマシンによる2クラス分類

前章の結果を踏まえて、サポートベクターマシン (SVM)を用いた分析を行う.SVMは、教師あり学習 を用いたパターン認識手法の一つである.基本的には2 つのクラスを識別するための識別器を構成するための学 習方法とされ、認識性能の優れた学習モデルの一つとい われている⁴.本研究では、Gaussianカーネルを用いた SVMを行う.また、共分散構造分析の結果より、基本 モデル(モデル1)のパスモデルで液状化発生確率にと



図-6 採用した6ケースの液状化抽出の的中率

表-3 液状化発生の起こりうる結果

| | | 実際の | データ |
|-----|-------|------------------------|------------------------|
| | | 液状化あり | 液状化なし |
| 分析 | 液状化あり | TP (True Positive) | FP (False Positive) |
| 新和果 | 液状化なし | FN (False Negative) | TN (True Negative) |

くに大きく影響を与えている地形的要因は,傾斜角と微 地形区分であることがわかった.したがって,SVMに おいては傾斜角,微地形区分,計測震度を利用して分析 を実行する.なお,SVMではカテゴリ変数である微地 形区分をダミー変数化¹⁴して使用する.

SVMによる2クラス分類では、式(11)で表される最適 化問題を解く.ここで、wは分離超平面の法線ベクトル、 Øは入力ベクトルxを特徴空間Fへ非線形写像する関数 (式(12))、Cはスラック変数、bはスカラー変数を表す⁴⁾.

$$\min_{\boldsymbol{w},\boldsymbol{b},\boldsymbol{\zeta}} \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^{2} + C \sum_{i \in [n]} \zeta_{i}$$
s.t. $y_{i}(\mathbf{w}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}_{i}) + \boldsymbol{b}) \geq 1 - \zeta_{i}, i \in [n], \zeta_{i} \geq 0, i \in [n]$
(11)

$$K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_i) = \phi(\mathbf{x}_i)^{\mathrm{T}} \phi(\mathbf{x}_i)$$
(12)

本研究では非線形写像のための関数に、次式のRBFカー ネルを用いる.

$$K(\mathbf{x}_{i}, \mathbf{x}_{j}) = \exp(-\gamma \left\| \mathbf{x}_{i} - \mathbf{x}_{j} \right\|^{2})$$
(13)

式(13)のγと式(11)のCは、ハイパーパラメータと呼ばれ分類結果に大きく影響する⁴.

また、本研究では予測結果の評価方法として正答率、 適合率、再現率、F値の4つの評価指標¹⁵⁾を導入する.各 指標式は式(14)~式(17)の通りであり、式中のTP、FP、 FN、TN は表-3のように定義される.

正答率(Accuracy) =
$$\frac{TP+TN}{TP+FP+FN+TN}$$
 (14)

適合率(Precision) =
$$\frac{TP}{TP+FP}$$
 (15)

再現率(Recall) =
$$\frac{TP}{TP+FN}$$
 (16)

$$F(\vec{n}(F-measure)) = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$
(17)

分類精度が最も高くなるハイパーパラメータを、グリ ッドサーチ¹⁰に基づき算出する. γとCの値の範囲を任意 に設定し、すべての組み合わせを試し、交差検証法によ り最も分類精度が高くなるγとCの組み合わせを求める. まず本研究では、全データの10%、30%、50%、70%を学 習データ、γの範囲を10⁵~10⁵、Cを10²~10²に設定して、 10分割の交差検証法によって適切なパラメータを求めた. その結果、図-7のように正答率、適合率、再現率は大き く変わらなかったが、学習率が70%の際にF値が最も良 い値となった.



図-7 学習データの割合と評価指標

表-4 学習データ70%(重みなし)での分析結果と 実際の液状化発生地点の比較

| 学習率 70% (重みなし) | | 実際の | データ |
|-------------------|-------|-------|-------|
| | | 液状化あり | 液状化なし |
| 分析 | 液状化あり | 321 | 88 |
| 新和果 | 液状化なし | 778 | 22722 |

正答率:96.4%, 適合率:78.5% 再現率:29.2%, F值:0.426

表-5 学習データ70%(重みあり)での分析結果と 実際の液状化発生地点の比較

| 学習率 70% (重みあり) | | 実際のデータ | | |
|-------------------|-------|--------|-------|--|
| | | 液状化あり | 液状化なし | |
| 分析 | 液状化あり | 985 | 4383 | |
| 結果 | 液状化なし | 140 | 18401 | |



学習率70%のときの最適解を与えるハイパーパラメー タ(*y*=2.51×10[°], *C*=1.0)を用いて分類器を作成し、学習 に用いなかった残りの30%のデータについて液状化地点 との比較を行ったものを**表-4**に示す.**表-4**では、実際の 液状化発生地点数よりも、SVMによって液状化発生と 分類されたメッシュ数が過小となった.これには、学習 データ中の液状化発生地点と非液状化地点数の不均衡が 影響しているものと考えられる^{ID}.

そこで、液状化発生危険地点のメッシュに重み付けを することにより、液状化地点を多く抽出できるようにす



図-8 共分散構造分析による液状化発生評価結果



図-9 SVMによる液状化発生評価結果

る.全データの70%を学習データとし,液状化発生地点 と非発生地点のデータ数の比に基づいて,液状化発生地 点に21倍の重み付けしたところ,最適なパラメータは >=2.51×10, C=1.6×10となった.SVMによる分類結果と 実際のデータとの比較結果を表-5に示す.重み付け前と 比較すると,正答率,適合率,F値は低下したものの, 再現率が大きく改善され,実際に液状化が発生地点を見 落とすことが少なくなった.

表-6 共分散構造分析での分析結果と実際の 液状化発生地点の比較

| 共分散構造分析 | | 実際のデータ | | |
|---------|-------|--------|-------|--|
| | | 液状化あり | 液状化なし | |
| 分析 | 液状化あり | 2924 | 14749 | |
| 新編果 | 液状化なし | 778 | 61244 | |

正答率:80.5%, 適合率:16.5% 再現率:79.0%, F值:0.274

表-7 微地形区分ごとの式(18)のパラメータ

| グループ | 微地形区分 | 平均值μ | 標準偏差σ |
|------|--------|-------|-------|
| 1 | 自然堤防,旧 | 6.960 | 0.761 |
| | 河道,砂丘間 | | |
| | 低地,干拓 | | |
| | 地,埋立地, | | |
| 2 | 扇状地, | 7.160 | 0.773 |
| | 砂州・砂礫州 | | |
| 3 | 後背湿地,三 | 7.906 | 0.933 |
| | 角州・海岸低 | | |
| | 地,砂丘 | | |
| 4 | 砂礫質台地, | 7.231 | 0.628 |
| | 谷底低地 | | |
| 5 | 上記以外 | 9.873 | 1.197 |

4. 液状化発生評価結果の比較

実際の液状化発生地点のデータと共分散構造分析および SVMにより算出した液状化発生評価結果を比較し,結 果をGIS上に表示した(図-8,図-9).なお,共分散構 造分析に基づく分類結果とそれに関連する精度は表-6の 通りである.共分散構造分析では,千葉県の北部の標高 の低いローム台地を中心に,実際の液状化発生地点より も過度に液状化発生の危険があるものと推定された.ま た,液状化地点の見落としが船橋市の沿岸部や佐倉市周 辺で数多く発生した.

SVMによる液状化発生評価結果(図-9)では、重み 付けをしたことによって、液状化地点の見落としが減少 した.さらに、共分散構造分析の際と比較してすべての 評価指標の値が良化し、精度が向上した.

本研究で構築したSVMによる液状化発生地点の分類 器の評価をするために、松岡らによる既往研究®による 液状化危険度の推定手法を千葉県に適用し比較を行った. 松岡ら[®]は、式(18)のように計測震度から液状化発生確率 を算出する手法を提案している



図-10 既往研究 %に基づく液状化発生確率の分布

表-8 既往研究[®]での推定結果と実際の 液状化発生地点の比較

| 焛 | 往研究 ⁸ | 実際の | データ |
|---------|------------------|-------|-------|
| 閾値:0.1% | | 液状化あり | 液状化なし |
| 分析 | 液状化あり | 2979 | 19773 |
| 結果 | 液状化なし | 725 | 56293 |

正答率:74.3%, 適合率:13.1% 再現率:80.4%, F值:0.225

$$P_{liq}(\mathbf{I}) = \boldsymbol{\phi}[\frac{\mathbf{I}-\boldsymbol{\mu}}{\sigma}] \tag{18}$$

ここで、P_{liq}(I)は計測震度Iにおける液状化発生確率、 は正規分布の累積分布関数、µは平均値、σは標準偏差 を表す.µとσは既往研究[®]に従って、表-7のように仮定 した.推定される液状化発生確率の分布を図-10に示す. さらに、図-10の液状化発生確率の閾値を既往研究[®]を参 考に0.1%と仮定して液状化発生、非発生を分類し、実際 の発生状況と比較した結果が表-8、図-11である.既往 研究で構築したSVMによる液状化発生地点の分類器の 方が良好な分類精度を示した.



図-11 既往研究 %による推定結果の4区分図

| 表-9 | 茨城県南部でのSVMによる分析結果と |
|-----|--------------------|
| | 実際の液状化発生地点の比較 |

| 千葉県で構築した SVM分類器 | | 実際の | データ |
|--------------------|-------|-------|-------|
| | | 液状化あり | 液状化なし |
| 分析結果 | 液状化あり | 2394 | 18631 |
| | 液状化なし | 174 | 17145 |

正答率:51.0%, 適合率:11.4% 再現率:93.2%, F值:0.203



図-12 茨城県南部でのSVMによる液状化発生評価結果

表-10 茨城県南部における既往研究⁸の推定結果と 実際の液状化発生地点の比較

| 既往研究 閾値:0.1% | | 実際のデータ | | |
|-----------------|-------|--------|-------|--|
| | | 液状化あり | 液状化なし | |
| 分析 | 液状化あり | 2390 | 15211 | |
| が結果 | 液状化なし | 178 | 20565 | |

正答率:59.9%, 適合率:13.6% 再現率:93.1%, F值:0.237



図-13 茨城県南部における既往研究%による4区分図

5. SWMによる液状化発生予測手法の適用性の評価

本研究で構築したSVMによる液状化発生地点の分類 器を,東北地方太平洋沖地震における計測震度が千葉県 と同程度であった茨城県南部に適用し,汎用性の評価を 行った.千葉県の際と同様に,茨城県の地形情報を国土 数値情報⁹と微地形区分⁹より整理した.液状化発生地点 は若松らがまとめた2011年の東北地方太平洋沖地震の際 のデータを用いた¹⁾.分析に用いたメッシュ数の総数は 38344メッシュであり,そのうち液状化発生地点は2568 メッシュ存在した.千葉県のデータを用いて構築した SVMによる液状化分類器を茨城県南部に適用した結果 を表-9,図-12に示す.正答率やF値,適合率は表-5より も低下したが,再現率は高く,液状化発生地点を見落と すことは少なかった.

茨城県南部にも松岡らの既往研究⁸を適用させ, 閾値 0.1%で液状化発生を評価した結果が表-10, 図-13である. 表-9と表-10を比較すると,本研究の正答率が既往研究 と比べてやや低いが,そのほかの指標はほぼ同程度の値 である.このことから,同一地震で計測震度が同程度の 地域であれば,別の地域を対象としたSVMによる液状 化予測モデルを適用することができるものと考えられる.

| 千葉県で構築した SVM分類器 | | 実際の | データ |
|--------------------|-------|-------|--------|
| | | 液状化あり | 液状化なし |
| 分析 | 液状化あり | 1240 | 9078 |
| 析結果 | 液状化なし | 632 | 101385 |

表-11 熊本県でのSVMによる分析結果と 実際の液状化発生地点の比較

正答率:91.4%, 適合率:12.0% 再現率:66.2%, F值:0.203



図-14 熊本県でのSVMによる液状化発生評価結果



図-15 熊本県における微地形ごとの液状化発生数と SVM 分類器による液状化発生地点の見落とし数の関係

次に別の地震を対象として、モデルの適用性に関する 検討を行う.本研究で構築したSVMによる液状化発生 予測モデルを、2016年に発生した熊本地震に適用する. 熊本県内112335メッシュを対象とし、そのうち液状化発 生地点は1872メッシュであった.SVMの入力データは国 土数値情報⁹、微地形区分⁶より整理し、熊本地震の計測 震度は松岡¹⁸による推定結果を用いた.液状化発生地点 は若松らがまとめた2016年の熊本地震の際のデータを用 いた¹⁹.本研究で構築したSVMに基づく液状化発生モデ ルの適用結果を表-11、図-14に示す.正答率は91.4%と 非常に高い値を示したが、再現率が23程度とやや低く、 液状化発生地点の見落としが多かった.見落としが発生 してしまった理由を考察するため、熊本県で液状化が発 生したメッシュと、本研究の手法で液状化発生を見落と したメッシュの微地形区分を比較した(図-15).本研 究のモデルでは、火山山麓地や火山性丘陵、扇状地で全 ての液状化メッシュを見落としていた.これは表-1のよ うに、千葉県では火山山麓地や火山性丘陵、扇状地で液 状化が未発生であるためであると考えられる.そこで、 火山山麓地など千葉県で液状化が未発生だった微地形区 分の地域を除いて再現率を算出すると、87.9%の精度を 示した.このことから、SVMによる液状化予測モデル は、学習データがすべての微地形区分を網羅するように 整理されれば、他の地震にも適用できる可能性があり、 今後の検討課題である.

6. まとめ

本研究では、共分散構造分析とサポートベクターマシンを用いて、東北地方太平洋沖地震の際の千葉県を対象として液状化発生地点を予測する手法を構築した. 共分散構造分析の結果によると、液状化の発生には微地形と傾斜角がとくに大きく影響することがわかった. SVMによる分析では、液状化発生地点に重み付けをしたところ、良好な結果を得ることができ、これを予測モデルとした.

液状化予測モデルの適用性を評価するために,同一地 震の同程度の地震動に曝された地域として,東北地方太 平洋沖地震の際の茨城県南部にモデルを適用した.その 結果,本研究のモデルは既往研究と同程度の汎用性があ ることを確認した.さらに,別の地震への適用性の検討 として,2016年熊本地震を対象とした分析を行った.そ の結果,学習データで液状化が発生していなかった火山 山麓地や扇状地での液状化発生を正しく推定することが できず,液状化の見落としがやや多くなった.一方,こ れらの微地形区分以外の液状化発生地点に関する再現率 は高かった.今後は,SVMによる学習用データの見直 しを行い,多くの微地形区分を網羅できるように再整理 するなどして,液状化予測モデルの適用性の向上を図る 必要がある.

参考文献

- 若松加寿江,先名重樹:2011 年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生と土地条件,日本地震工学会 論文集, Vol.15, No.2, pp.25-44, 2015.
- 2) 内閣府(防災担当):これまでの首都直下地震対策につ いて、http://www.bousai.go.jp/jishin/syuto/taisaku_wg/1/pdf/1.pdf
- 3) 豊田秀樹: 共分散構造分析[R編], 東京図書, 2014.
- 竹内一郎,鳥山昌幸:サポートベクトルマシン(機械学習 プロフェッショナルシリーズ),講談社,2015.

- 5) 国土交通省:国土数値情報ダウンロードサービス, http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/
- 若松加寿江,松岡昌志:全国統一基準による地形・地盤 分類250mメッシュマップの構築とその利用,日本地震工 学会誌,No.18,pp.35-38,2013.
- 産業技術総合研究所:地震動マップ即時推定システム, https://gbank.gsj.jp/QuiQuake/Quake/Map/index.html
- 8) 松岡昌志,若松加寿江,橋本光史:地形・地盤分類 250m メッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法,日本 地震工学会論文集, Vol.11, No.2, pp.20-39,2011.
- 小島尚人、大林成行、青木太:共分散構造分析を導入した斜面崩壊危険箇所評価アルゴリズムの構築、土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.79-93, 2002.
- 大林成行,小島尚人, Chang-Jo F.Chung:斜面安定性評価 モデルの精度比較とその実用化への提案,土木学会論文 集, No.630/VI-44, pp.77-89, 1999.
- 豊田秀樹:共分散構造分析[疑問編] —構造方程式モデ リングー,朝倉書店,2003.
- 12) 岡浩一朗,石井香織,柴田愛:日本人成人の身体活動に 影響を及ぼす心理的,社会的,環境的要因の共分散構造 分析,体力科学, Vol. 60, No. 1, pp. 89-97, 2011.
- ・ガラフィカルモデリングのための G-GM&L-GM データ解析システム,計算機統計学, Vol. 15, No. 1, pp. 63-74, 2003.
- 14) 豊澤栄治:最終回/ダミー変数を使って上手にデータを まとめ、グループごとの特徴を把握しよう【R 入門講 座】, http://markezine.jp/article/detail/20790
- 15) 【機械学習】モデル評価・指標についてのまとめと実行, https://qiita.com/kenmatsu4/items/0a862a42ceb178ba7155
- 16) 荒川正幹, 宮尾知幸, 船津公人:ドラッグライクネスモ デルの構築とその可視化, Journal of Computer Aided Chemistry, Vol.9, pp. 70-80, 2008.
- 17) 齋竹良介,荒井幸代:実被害情報を活用した水道管被害 箇所のオンライン再推定,人工知能学会全国大会論文集, Paper No. 1M3-OS-24b-4, 2015.
- 松岡昌志:強震観測記録に基づく 2016 年熊本地震の地震 動分布の推定,地域安全学会梗概集, No.42, pp.23-26, 2018.
- 19) 若松加寿江,先名重樹,小澤京子:平成28年(2016年) 熊本地震による液状化発生の特性,日本地震工学会論文 集, Vol.17,No.4,pp.81-100,2017.

ESTIMATION OF THE LOCATIONS OF LIQUEFACTION OCCURRENCES BASED ON COVARIANCE STRUCTURE ANALYSIS AND SUPPORT VECTOR MACHINE

Masao YANASE and Yoshihisa MARUYAMA

This study tries to develop a method to estimate the locations of soil liquefaction occurrences based on the covariance structure analysis and support vector machine. The risk assessment map for soil liquefaction is illustrated, and it is compared with an existing map to show liquefaction evidences. To achieve the objective, the datasets of liquefaction occurrences after the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku earthquake and the 2016 Kumamoto earthquake were employed in this study. The numerical model based on the weighted SVM, which considers the JMA seismic intensity, slope, and Japan Engineering Geomorphologic classification, is proposed to estimate the locations of liquefaction.