

# 地盤の液状化を加速度応答のみから推定するための特徴量の分析

東北大学 吉留大生, 鳥屋部佳苗, 加村晃良, 風間基樹

## 1. はじめに

地盤の液状化を予測・判定する手法は、地盤調査結果に基づく簡易判定法から、室内試験や数値解析による詳細法まで種々存在する。しかし、これらの手法は、最も簡便なものであっても原位置の地盤情報を必要とするため、広域での即時的評価や、液状化リスクの一次スクリーニング等の観点で課題がある。このような背景から、Kamura et al.<sup>1)</sup>は、地震動の加速度記録のみから地盤の液状化を予測判定する深層学習技術を提案している。さらに、鳥屋部ら<sup>2)</sup>は、このモデルに対して、K-NET および KiK-net<sup>3)</sup> 観測網のデータを利用し、広域での適用性を検討した。これら成果では、液状化判定に関して一定の妥当性は示されているものの、同時に、さらなる教師データ（液状化時の加速度データ）と特徴量評価の必要性が指摘されている。そこで本研究では、Kamura et al.<sup>1)</sup>が行った振動台実験の1次データに着目し、液状化時に有意に変化する各種特徴量の詳細な分析を実施した。

## 2. 実験データの取得と分析対象

本研究では、3次元加速度入力による飽和地盤の振動台実験120ケースの結果<sup>1)</sup>と今回実施した119ケースの結果を合わせた239ケースの実験結果から得られた地表面応答加速度データを分析対象とした。入力地震動は、表1に示すものを使用し、振幅を任意倍することで異なる波形を複数作成した。地震動の継続時間は、加速度の最大値の5%が最初に現れてから、最後に現れるまでの時間と定義した。この地震動の継続時間を3等分し、後半の2/3区間において、過剰間隙水圧の時刻歴平均が高いデータと低いデータ（後述）に分け、それら特性の違いを分析した。この分類は参考文献1)の液状化の分類定義に対応している。なお、図1には地震動の入力データと、ランニングスペクトル解析の変化の例を示す。

このようにして取得した振動台実験の加速度データ（1次データ）を処理することで、①最大加速度（3方向）②1次卓越周波数（3方向）、③震度、④地震動継続時間、⑤最大速度（3方向）、⑥SI値、⑦H/Vスペクトル比の最大値を特徴量として得ている。また①最大加速度、②1次卓越周波数、⑤最大速度、⑦H/Vスペクトル比については時刻歴3分割した区間毎の最大値を取得することで、時間変化の評価も行った。

## 3. ロジスティック回帰分析の概要

239の波形データを分析対象とし、目的変数に過剰間隙水圧比0.6以上のデータを「1」、過剰間隙水圧比0.6未満のデータを「0」と設定した。この説明変数には、1次データの特徴量に加え、①最大加速度、②1次卓越周波数、⑤最大速度、⑦H/Vスペクトル比の各特徴量の変化比率も追加した。ここで、変化比率は各特徴量が3区間のうちどの程度変化したかを示す指標と定義し、各特徴量について、（着目する区間の値）/（着目する区間の前の値）とした。

\* Analysis of feature amount for estimating liquefaction degree based only on seismic data by Taisei Yoshitome

表 1 振動台実験 239 ケースの入力地震動（原波形）

観測地点	観測日	地震名
石巻（宮城）	2003. 5. 26	宮城県沖地震
長岡（新潟）	2004. 10. 23	新潟県中越地震
柏崎（新潟）	2007. 7. 16	新潟県中越沖地震
浦安（千葉）	2011. 3. 11	東北地方太平洋沖地震
宇土（熊本）	2016. 4. 14	熊本地震
苫小牧（北海道）	2018. 9. 6	北海道胆振東部地震
鹿嶋（茨城）	2011.3.11	東北地方太平洋沖地震
今市（栃木）	2011.3.11	東北地方太平洋沖地震
小名浜（福島）	2011.4.11	福島県浜通りの地震
佐倉（千葉）	2011.3.11	東北地方太平洋沖地震

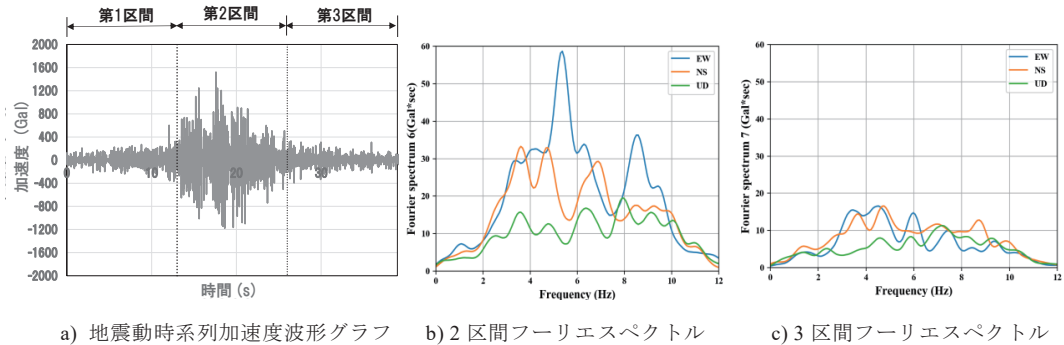
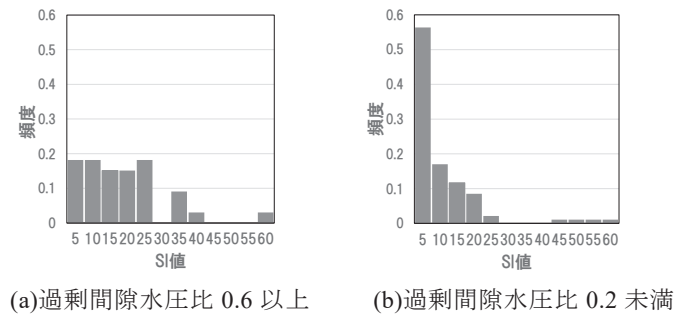
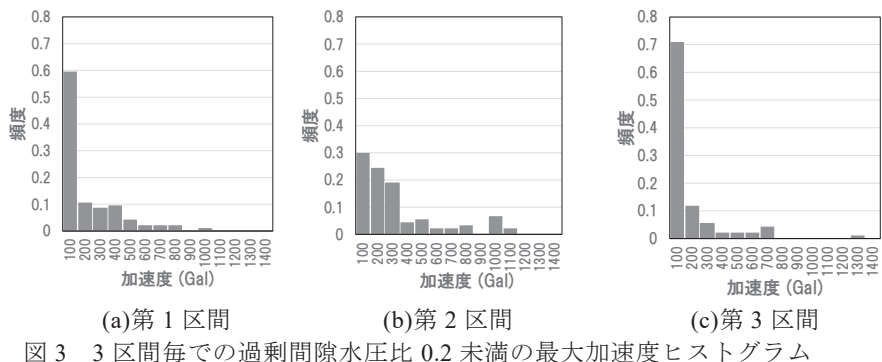
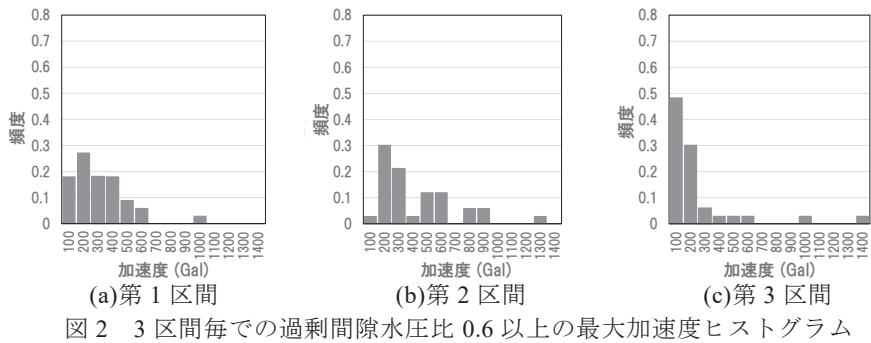


図 1 地震動継続時間の 3 区間分割とランニングスペクトルの解析結果の例

## 4. 分析結果

### 4.1 1次データの度数分布

1次データの度数分布の一例を図2から図4に示す。まず、図2に示す過剰間隙水圧比0.6以上のデータ群の最大加速度に着目する。第1区間で200 Gal以上のクラスが半数以上を占めており、第2区間にかけては大きく変化せず、第3区間で約半数が100 Gal以下のクラスに存在している。一方、図3に示す過剰間隙水圧比が0.2未満のデータ群に着目すると、第1区間では約6割が100 Galまでのクラスに存在していることがわかる。そして第2区間にかけて大きいクラスへと増加し、第3区間で約7割が100 Gal以下の小さいクラスに存在している。これら傾向は、過剰間隙水圧比（液状化の度合い）が高くなると、地盤の剛性が低下して、加速度応答レベルが下がることに対応している。これらのことから、液状化の前後で有意に変化する指標は、変化比率としてデータセット化することが有意義であると考えられる。図4のSI値についてみると、液状化度の高いデータ群は液状化度の低いデータ群に比べて、大きいクラスに存在する傾向がある。これは、そもそもの入力地震動の大きさによるものである。



#### 4.2 ロジスティック回帰分析の結果

ロジスティック回帰分析の結果を表2に示す。オッズ比の値が1.0以下の項目は過剰間隙水圧の低いケースに影響を及ぼしており、値が1.0以上の項目は過剰間隙水圧が高いケースに影響を及ぼしていると読み取ることができるので、これら結果より、加速度（水平、鉛直成分）や、1次卓越周波数、速度（水平、鉛直成分）そのものの値よりも、変化比率の方が地盤の液状化前後で変化を捉えやすいことが分かる。また、第1区間から第2区間にかけての水平方向の加速度の変化比率をみると、値が大きくなると過剰間隙水圧の低いケースに影響を及ぼしてい

る。これは、地盤の剛性が低下しておらず、加速度応答が大きく出ているためと解釈できる。さらに、同区間の周波数の変化比率に着目すると、値が大きくなると過剰間隙水圧比の低い方に影響を及ぼしていることが分かる。これは過剰間隙水圧の高い（すなわち液状化している）地盤は長周期化することに対応している。また、震度が大きくなれば液状化度の高い地盤に影響を及ぼしており、一般的な知見どおりの傾向もみられる。

表2 ロジスティック回帰分析結果

項目	オッズ比	項目	オッズ比
第1区間水平方向 最大加速度	0.984	1→2区間 水平1次卓越周波数 変化比率	0.1以下
第1区間上下方向 最大加速度	1.001	1→2区間 上下1次卓越周波数 変化比率	6.508
第2区間水平方向 最大加速度	1.006	2→3区間 水平1次卓越周波数 変化比率	0.1以下
第2区間上下方向 最大加速度	0.990	2→3区間 上下1次卓越周波数 変化比率	0.371
第3区間水平方向 最大加速度	0.986	1→3区間 水平1次卓越周波数 変化比率	10以上
第3区間上下方向 最大加速度	1.100	1→3区間 上下1次卓越周波数 変化比率	0.100
1→2区間水平加速度 変化比率	0.264	地震動継続時間	0.989
1→2区間上下加速度 変化比率	1.581	震度	10以上
2→3区間水平加速度 変化比率	10以上	第1区間 水平方向最大速度	1.019
2→3区間上下加速度 変化比率	0.1以下	第1区間 上下方向最大速度	0.608
1→3区間水平加速度 変化比率	0.1以下	第2区間 水平方向最大速度	0.567
1→3区間上下加速度 変化比率	0.400	第2区間 上下方向最大速度	1.532
第1区間水平方向 1次卓越周波数	1.574	第3区間 水平方向最大速度	1.112
第1区間上下方向 1次卓越周波数	0.359	第3区間 上下方向最大速度	0.418
第2区間水平方向 1次卓越周波数	1.362	1→2区間 水平最大速度 変化比率	2.369
第2区間上下方向 1次卓越周波数	1.473	1→2区間 上下最大速度 変化比率	0.333
第3区間水平方向 1次卓越周波数	0.570	2→3区間 水平最大速度 変化比率	0.1以下
第3区間上下方向 1次卓越周波数	0.999	2→3区間 上下最大速度 変化比率	0.1以下
第1区間 H/Vスペクトル比	0.898	1→3区間 水平最大速度 変化比率	1.182
第2区間 H/Vスペクトル比	2.519	1→3区間 上下最大速度 変化比率	10以上
第3区間 H/Vスペクトル比	0.492	SI値水平方向	1.282
H/Vスペクトル比 変化比率	0.796		

## 5. まとめ

3次元加速度入力による振動台実験の結果 239 ケースの地表面応答加速度時刻歴データを分析し、液状化（過剰間隙水圧比の上昇）前後で変化する特徴量を評価した。ロジスティック回帰分析の結果から、加速度（水平、鉛直成分）、1次卓越周波数、速度（水平、鉛直成分）については、そのもの自体の値よりも、変化比率の方が液状化の度合いと結びつけられることのできる特徴量として、有意義であることが示された。今後の発展として、例えば Kamura et al.<sup>1)</sup>が提案している地震動のみから液状化の程度を判定する手法に適用できる可能性がある。

## 6. 参考文献

- 1) Kamura et al.: Exploring the possibility of assessing the damage degree of liquefaction based only on seismic records by artificial neural networks, *Soil and Foundations*, Vol.61, Issue 3, pp.658-674, 2021.
- 2) 鳥屋部佳苗, 加村晃良, 風間基樹: 強震観測データのみから地盤の液状化の程度を判定する深層学習技術の妥当性の検討 - 東北地方太平洋沖地震を事例として -, *土木学会(JI) AI・データサイエンス*, 第2巻, 第J2号, pp598-608, 2021
- 3) 防災科学技術研究所: 強震観測網 (K-net, KiK-net) 強震記録 (2011年3月11日), <https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>