

# ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法の提案

川井 修<sup>1</sup>・丸山 喜久<sup>2</sup>・山崎 文雄<sup>3</sup>

<sup>1</sup>千葉大学大学院生 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: 08TM0308@graduate.chiba-u.jp

<sup>2</sup>千葉大学大学院助教 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

<sup>3</sup>千葉大学大学院教授 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

本論文では液状化発生地点の早期把握のために、液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点の計112地点を選出し、加速度記録から算出するゼロクロス周期を用いた液状化判定手法を提案する。液状化地点の加速度記録において、水平方向の卓越周期は長周期化する傾向がある一方で、その時上下方向の卓越周期はあまり変化しない傾向がある。この振動数特性を捉えるために、簡易で即時性が高いゼロクロス周期を利用して、周期の時刻歴変化を把握する。得られたゼロクロス周期の水平・上下方向に条件を与え液状化を判定するとともに、既往の手法と比較することで本手法の有効性を確認した。

**Key Words :** *detection of liquefaction, zero crossing period, seismic ground motion, surface wave, vertical component*

## 1. はじめに

2004年新潟県中越地震や2008年新潟県中越沖地震などの大きな地震が発生すると、地域の社会的・経済的な活動に影響するような重大な被害を与える。ガス・水道管等の埋設管や港湾構造物などの都市インフラの被害は、液状化現象による地盤変状と関係している場合がある。よって地震発生後、早期に液状化の発生地点を把握することは、地震防災上重要性が高い。

日本には、多数の強震計が設置されており、近年の地震における液状化発生地点の記録も得られている。液状化地点の記録において、水平方向の卓越周期は伸びる傾向があるが、その一方で、上下方向の卓越周期は伸びない傾向が知られている。水平方向の加速度記録の周期の変化は、非排水状態での間隙水圧上昇に起因する土の剛性低下によるものであると考えられる。専用の計器で間隙水圧を観測し液状化発生を特定することはかなりのコストがかかるが、加速度記録を用いた液状化発生の検知は、追加のコストがかからない利点がある。このような方法は、現在配備されている地震計の観測記録を利用することができ、地震後すぐに液状化の発生を特定できるものと期待される。

加速度記録を用いた液状化判定の方法は、過去に幾つかの方法が提案されている。鈴木ら<sup>1)</sup>や宮島<sup>2)</sup>

らは、加速度記録から、振幅、振動数やエネルギーパラメータを用いて液状化の発生を判定する方法を提案した。しかし、これらの方法は、主に水平方向の卓越周期の変化を対象としており、上下動について考慮していないため、表面波の影響を取り除くことは難しい。Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup>や清野ら<sup>4)</sup>は、水平方向の周期だけではなく上下方向の周期変化も併せて検討した。この上下方向の卓越周期を考慮することで、表面波の到来を液状化発生と誤認することが減ると予想される。

東京ガス(株)のリアルタイム地震防災システム SUPREME<sup>5)</sup>では、都市ガス供給エリア内に約4,000箇所配備したSIセンサーによる地震動モニタリングを実施し、その結果は地震直後の緊急対応体制の確立に役立てられている。SIセンサーには、地震防災対策の一環として、加速度記録より液状化発生の有無を判定する機能が搭載されている。これは、鈴木ら<sup>1)</sup>の方法がベースとなっており、これまで上下動成分は観測されてはいるが、使用されていなかった。

こうした既往の研究が行われた後、日本では地震計の数が増え、以前より液状化地点も含めて多数の地震記録が得られている。本研究では、新しく得られたデータを追加して、液状化判定方法の精度の向上を目指す。加えて、液状化・非液状化地点の記録を含んだデータセットに基づいて、東京ガス(株)のSUPREMEシステムにおいて、供給エリア内に配

備されたSIセンサーでのリアルタイム液状化判定に使用可能な簡易な方法を提案する。

## 2. 既往の研究

加速度記録から液状化を判定する研究は前述のように様々あるが、まずKostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup>の手法を取り上げる。この判定法では、まず、水平2方向・上下方向の加速度記録のうち最初に40cm/s<sup>2</sup>を越える時刻から最後に40cm/s<sup>2</sup>を超える時刻までの間について、Hammingウィンドウを用いて平滑化されたフーリエスペクトルをデータ数256を一つの区間として求める。それぞれのフーリエスペクトルから、次式に表される瞬間平均振動数 (MIF) を計算する (図-1)。

$$MIF(t) = \frac{\int fP(t, f)df}{\int P(t, f)df} \quad (1)$$

得られた瞬間平均振動数を用いて、最大速度 (PGV) が10cm/s以上の場合に液状化の発生を判定する。判定基準は、 $MIF_H \leq 2/3\text{Hz}$ かつ $MIF_H \geq 3\text{Hz}$ が0.1秒以上継続した場合には液状化、 $MIF_H \leq 1\text{Hz}$ かつ $MIF_H \geq 3\text{Hz}$ が0.1秒以上継続した場合には液状化の疑い、いずれにも当てはまらない場合には日液状化とされている。ここで、添字Hは水平成分、Vは上下成分を表す。

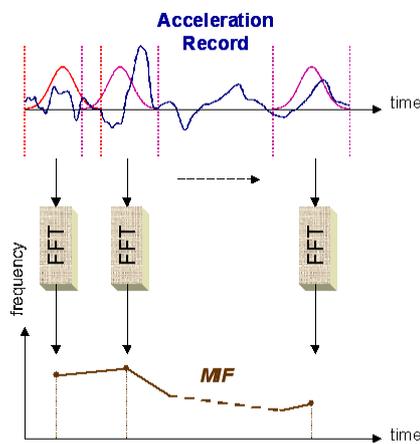


図-1 瞬間平均振動数の計算イメージ

また、実際に東京ガス (株) のSIセンサーでは、SI値が20cm/s以上 (水平8方向最大値) の地震動が観測された場合に液状化判定を行っている。SIセンサーでは、水平成分のゼロクロス周期が1.0秒以上 (ただし、このときの加速度振幅が100cm/s<sup>2</sup>以上)、式 (2) で表わされる等価変位<sup>1)</sup> Dが10cm以上の条件すべてを満たした場合に、液状化発生と判定される。

$$D \approx \frac{2SI^2}{A_{MAX}} \quad (2)$$

## 3. 本研究で使用する加速度波形データセット

本研究で使用するデータは、1998年以前の地震については、Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup>で使用した液状化 (LIQ) 地点12箇所、液状化の可能性のある (SUS) 地点5箇所、非液状化 (NON) 地点66箇所、計83地点のデータと同じものを使い、1999年以降の記録については、本研究で新たに追加した。追加データは、液状化地点3箇所、液状化の可能性のある地点6箇所、非液状化地点20箇所の計29地点であり、その一覧を表-1に示す。なお、非液状化地点の加速度記録に関しては、原則として各地震で最大加速度 (PGA) が大きいものを選択している。

本研究でLIQ, SUSと判断した計9箇所の根拠を示す。2000年鳥取県西部地震の境港 (LIQ) については、2000年鳥取県西部地震災害調査報告<sup>6)</sup>で、「地盤が第四紀の地質 (沖積層や洪積層など) であり、ボーリングデータから砂でN値が10以下でもある。この周辺では、多くの液状化が確認されており、液状化の可能性が非常に高い」とされており、液状化地点と判断した。

2003年十勝沖地震のK-NET直別 (HKD086, LIQ) は、液状化の影響で地震計が傾いていた<sup>7)</sup>。2007年新潟県中越沖地震の刈羽村役場 (LIQ) に関しては、地震発生後3日経過した刈羽村役場の現地調査の写真 (図-2) より、役場敷地内の地震計が設置されている盛土が液状化しているものと判断した。

1999年台湾・集集地震の員林 (TCU110, SUS) は、図-3にあるように、Tsosui川の厚い沖積層の上にある。基盤は東から西へ行くにつれて深くなり、深さ200m以上に達する。N値が2程度の非常に緩い砂層が見られ、地下水位は一般に地表から0.5~4.0mの深さである。員林の西部には砂層より厚い粘性土層があり、東に行くにつれてそれは薄くなっている。液状化する可能性がある砂層の上に厚い粘性土層がある地域では噴砂はほとんど見られていない。粘性土層が厚い地域では、その下の砂層の液状化と考えられる地盤沈下や建物の傾斜が生じていることなどから、TCU110では粘土層下5~10m程度の砂層が液状化したとも考え、SUSと判断した<sup>8)</sup>。

2000年鳥取県西部地震のK-NET米子 (TTR008) では、ボーリングデータにおいて表層より5m以下にN値が小さい砂質土が存在する<sup>9)</sup>。K-NET米子地震計が設置されている公園の敷地内では噴砂の痕跡は見られなかったが、近くの米子駅で液状化の影響と思われる地盤沈下が生じていること<sup>10)</sup>などをふまえて、SUSと判断した。2003年十勝沖地震のKiK-net豊頃 (TKCH07) に関しては、周辺に多数のマンホールの浮き上がりや道路の陥没が報告されている<sup>11)</sup>が、主に埋め戻し土の液状化によるもので、地震計設置位置に噴砂などの明確な液状化の痕跡が確認されなかったためSUSとした。2003年十勝沖地震の釧路町役場では、図-4のように、釧路町役場の建物周辺で地盤が沈下し、建物との間に隙間が生じており<sup>12)</sup>、砂も確認されたが噴砂かどうか

表-1 追加した地震データ

| 地点                    | PGA (cm/s <sup>2</sup> ) |         |        | PGV<br>ベクトル和 | 報告  |
|-----------------------|--------------------------|---------|--------|--------------|-----|
|                       | EW                       | NS      | UD     |              |     |
| 1999/09/21 台湾・集集地震    |                          |         |        |              |     |
| 石岡 (TCU068)           | 501.9                    | 362.18  | 519.77 | 284.85       | NON |
| 南投 (TCU076)           | 380.49                   | 420.35  | 312.73 | 91.47        | NON |
| 員林 (TCU110)           | 114.14                   | 187.87  | 116.01 | 57.66        | SUS |
| 霧峰 (TCU065)           | 774.86                   | 563.67  | 257.91 | 146.59       | NON |
| 日月潭 (TCU084)          | 989.82                   | 423.1   | 311.93 | 130.72       | NON |
| 2000/10/06 鳥取県西部地震    |                          |         |        |              |     |
| 江府 (TTR007)           | 573.23                   | 725.44  | 404    | 46.27        | NON |
| 米子 (TTR008)           | 383.57                   | 314.4   | 307.74 | 54.44        | SUS |
| 境港                    | 301.63                   | 209.99  | 99.53  | 60.66        | LIQ |
| 2001/3/24 芸予地震        |                          |         |        |              |     |
| 呉 (HRS019)            | 425.28                   | 311.91  | 203.14 | 24.71        | NON |
| 2003/09/26 十勝沖地震      |                          |         |        |              |     |
| 直別 (HKD086)           | 784.95                   | 738.59  | 271.69 | 265.88       | LIQ |
| 大樹 (HKD098)           | 345.93                   | 366.13  | 201.58 | 101.99       | NON |
| 豊頃 (TKCH07)           | 404.09                   | 367.12  | 148.05 | 365.88       | SUS |
| 釧路町役場                 | 324.9                    | 480.4   | 219    | 63.9         | SUS |
| 2004/10/23 新潟県中越地震    |                          |         |        |              |     |
| 小千谷 (NIG019)          | 1307.91                  | 1147.42 | 820.17 | 128.05       | NON |
| 長岡支所 (NIG028)         | 705.86                   | 870.39  | 435.59 | 70.27        | NON |
| 川口町役場                 | 1675.83                  | 1141.93 | 869.62 | 150.66       | NON |
| 2007/03/25 能登半島地震     |                          |         |        |              |     |
| 穴水 (ISK005)           | 781.67                   | 473.46  | 555.75 | 102.41       | NON |
| 富来 (ISK006)           | 849.15                   | 717.47  | 462.18 | 60.54        | NON |
| 輪島 (ISK003)           | 396.04                   | 518.99  | 141.46 | 44.15        | NON |
| JMA 輪島                | 438.79                   | 463.55  | 189.75 | 98.76        | SUS |
| 2007/07/16 新潟県中越沖地震   |                          |         |        |              |     |
| 柏崎 (NIG018)           | 513.59                   | 667.04  | 369.04 | 128.29       | SUS |
| 刈羽村役場                 | 464.92                   | 374.07  | 400.73 | 155.63       | LIQ |
| 柏崎 IC                 | 490.63                   | 388.66  | 343.02 | 123.24       | NON |
| 柏崎刈羽原子力発電所<br>サービスホール | 437.4                    | 347.21  | 590.34 | 126.56       | NON |
| 2008/6/14 岩手・宮城内陸地震   |                          |         |        |              |     |
| 一関西 (IWITH25)         | 747.92                   | 1036.19 | 680.76 | 47.14        | NON |
| 東成瀬 (AKTH04)          | 255.49                   | 173.14  | 138.42 | 15.6         | NON |
| 一関東 (IWITH26)         | 210.94                   | 278.46  | 167.28 | 38.96        | NON |
| 築館 (MYG004)           | 678.28                   | 739.94  | 224.28 | 49.4         | NON |
| 鳴子 (MYG005)           | 521.38                   | 440.28  | 665.78 | 69.54        | NON |



図-2 刈羽村役場地震計位置の地震3日後の様子

不明なのでSUSとした。

2007年能登半島地震のJMA 輪島に関しては、ボーリングデータにおいて、深さ24m程度まで粘性土と砂質土が互層をなしており、地下の浅い部分は軟弱であると考えられる。さらにJMA輪島地震計が設置されている輪島地方合同庁舎の付近で噴砂が確認されている<sup>13)</sup>ことをふまえてSUSと判断した。2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎 (NIG018) に関しては、噴砂などの液状化の痕跡は確認されな

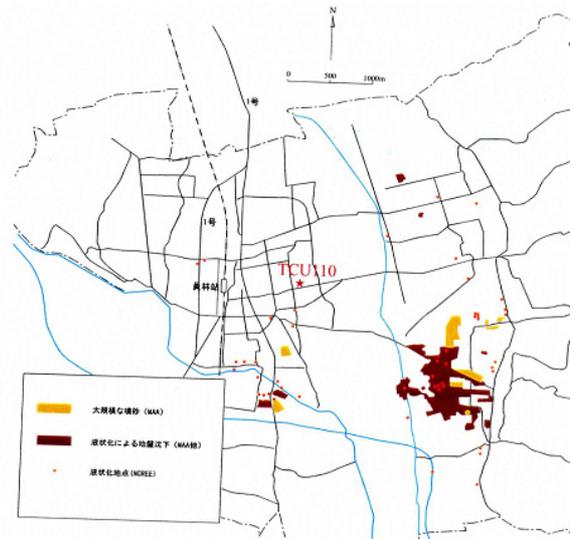


図-3 員林鎮における液状化地点<sup>8)</sup>



図-4 釧路町役場の被害写真<sup>12)</sup>

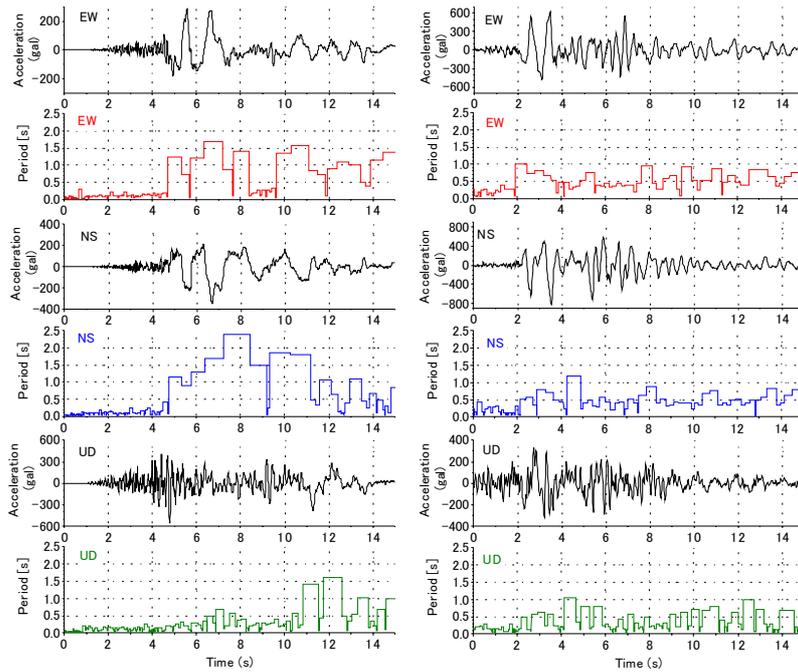
かったが、サイクリックモビリティを示す波形が観測された<sup>14)</sup>。一方で、防災科学技術研究所<sup>15)</sup>は観測波形に現れた非線形性状は液状化などの影響ではなく、ある程度のエリアを代表する地震動特性であるとしていることをふまえて、SUSとすることにした。

#### 4. ゼロクロス周期を用いた液状化判定手法

液状化により水平方向の加速度記録が長周期化する様子を捉えるために、ゼロクロスによる時刻歴の周期を考える。この方法は、地動加速度がゼロ線を通った時間幅を震動の半周期と定義し、その時間間隔を2倍することでゼロクロス周期を算出した。

図-5に、1995年兵庫県南部地震における液状化地点記録のポートアイランド (地表) と非液状化地点記録のJMA神戸の加速度波形とゼロクロスによる時刻歴の周期変化を示す。フーリエ変換などの周波数領域での計算を行わない本手法であるが、地動加速度の周期変化が捉えられている。また液状化地点であるポートアイランドでは、水平動の卓越周期が長周期化していることが分かる。

そこで、ゼロクロス周期を用いて、液状化発生の有無を判定する。液状化を判定するための特徴量は Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup> が用いているものと等価



(a) ポートアイランド (地表)

(b) JMA神戸

図-5 1995年兵庫県南部地震における液状化・非液状化地点の加速度記録とゼロクロス周期

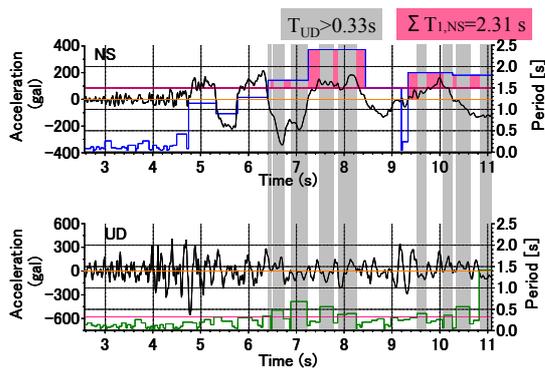


図-6 兵庫県南部地震ポートアイランド記録 (地表面) でのゼロクロス周期の累積

なもの、すなわち水平方向に対してはゼロクロス周期1.5秒以上と1.0秒以上、上下方向に対しては周期0.33秒以下とした。継続時間を評価するために、水平・上下方向に対して条件を満たしている時間を累積加算していくこととした。上下方向の周期が0.33秒以下で水平方向の周期1.5秒を越えている累積時間を $\Sigma T_1$ とし、同様に周期1.0秒を超えている累積時間を $\Sigma T_2$ とした。なお、水平方向は2成分(東西、南北方向)あるので、両成分別々に累積時間を取りその合計を $\Sigma T_1$ 、 $\Sigma T_2$ とする。また、ゼロクロス周期を計算する区間については、水平2方向の加速度記録において、どちらかの成分が最初に $40\text{cm/s}^2$ を超える時刻を判定開始時刻 $t_s$ 、最大振幅発現後に加速度振幅が $100\text{cm/s}^2$ 以下になってから5秒後を判定

終了時刻 $t_E$ とする。

図-6に1995年兵庫県南部地震のポートアイランド記録(地表面、NS成分)を用いて、ゼロクロス周期の累積の様子を示す。図中の赤線が水平方向の周期1.5秒、上下方向の周期0.33秒を示している。グレーの部分には、水平成分の周期は1.5秒以上であるが、上下成分の周期が0.33秒より長い $\Sigma T_1$ として累積されない部分である。図中の赤色の部分が累積されて、ポートアイランド記録のNS成分では $\Sigma T_1$ が2.31秒となる。

図-7に各地震記録の $\Sigma T_1$ 、 $\Sigma T_2$ の結果を示す。液状化地点、非液状化地点の $\Sigma T_1$ 、 $\Sigma T_2$ の関係性をふまえて、液状化判別のための閾値を $\Sigma T_1=0.8\text{s}$ とする。このように閾値を定めると、液状化(LIQ)地点が1つ境界線の下方にあるが、これは1964年新潟地震の川岸町での記録である。図-8に川岸町記録のゼロクロス周期の累積の様子を示す。水平成分のゼロクロス周期が1.5秒以上のときのほとんどの区間で、上下成分も周期が0.33秒より長くなっていることが分かる。この地点は、液状化の影響で地震計が設置されている建物が傾いており、水平方向の加速度記録の長周期化と同時に上下方向の加速度記録も長周期化していたため、累積時間が短くなったものと思われる。

非液状化地点(NON)のいくつかは、 $\Sigma T_1$ が $0.8\text{s}$ 以上を示している。このような地点は、強い揺れに見舞われて強非線形性を示した地点や、上下動の周期特性を考慮しても表面波の影響が除去しきれなかった地点であると考えられる。これらの地点を加速度波形の周期特性のみから液状化地点と区別するこ

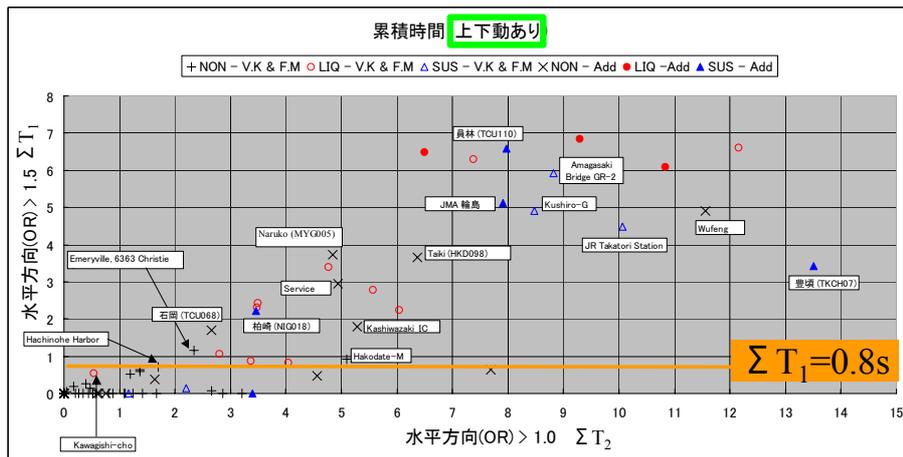


図-7 各地震記録の  $\Sigma T_1$ ,  $\Sigma T_2$  の結果

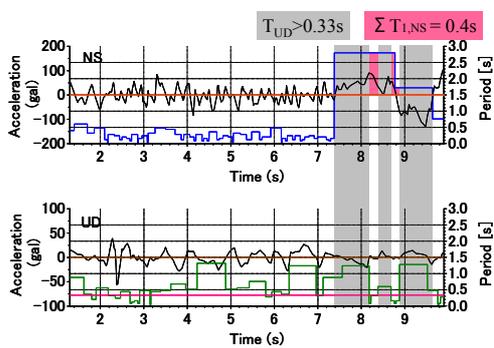


図-8 1964年新潟地震の川岸町記録でのゼロクロス周期の累積

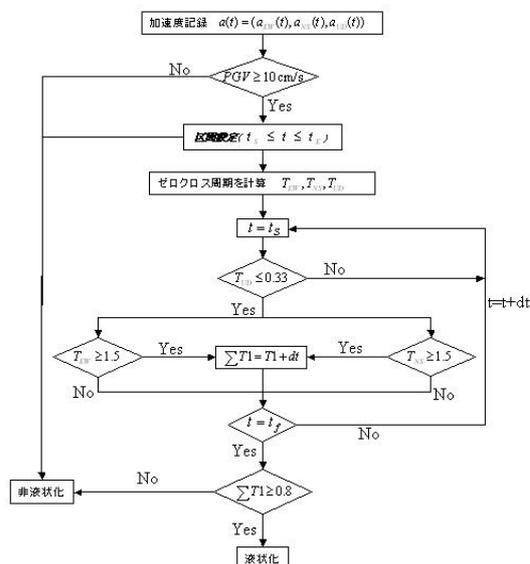


図-9 ゼロクロス周期を用いた液化化判定手法のフロー

とは難しい. 実用的にはボーリングデータなどの地盤データを予め参照し, 液化化発生が懸念される地点かどうかを事前に精査した上で, 本手法を適用することが望ましいと考えられる.

以上までの検討をふまえて, ゼロクロス周期を用いた液化化判定手法を図-9のように提案する. まず,

地震動のPGV (水平2方向合成値) が10cm/s未満であれば地震動が小さいため液化化は発生しないとして, ゼロクロス周期の判定を行わない. 液化化判定を行う区間である  $t = t_s \sim t_E$  についてゼロクロス周期の閾値の判定とその継続時間を集計し, 得られた  $\Sigma T_1$  をもとに液化化の判定を行う.

## 5. 液化化判定精度の検証

本研究の提案手法では, 表面波が到来することによる地動の長周期化が影響した誤判別を少なくする目的で, 上下方向の加速度波形に関してもゼロクロス周期を算出し, 考慮に入れている. その効果を明らかにするために, 図-10に図-9に示したフローのうち上下方向のゼロクロス周期を考慮しなかった場合の各地震記録の  $\Sigma T_1$ ,  $\Sigma T_2$  を示す. 参考までに本研究の提案する基準値 ( $\Sigma T_1 = 0.8 \text{ s}$ ) を図中に示しているが, 上下動を考慮しないと液化化地点, 非液化化地点が万遍なくばらつく結果となっており, この結果をもとに閾値を設定して液化化判定を行うことは難しいと考えられる. したがって, 上下動を考慮に入れることは加速度波形から液化化判定を行う際には重要であると思われる.

上下動を考慮に入れた液化化判定手法である Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup> による判定結果と本研究の手法, 加えて東京ガス (株) の液化化アルゴリズムの3つの手法について比較する. 図-11に液化化地点, 液化化が疑わしい地点, 非液化化地点ごとに両手法の判定結果を比較する. 液化化が疑わしい地点の判定結果に関しては, 本研究の提案手法と東京ガスの精度がわずかに劣るように思われる. 液化化地点, 非液化化地点に関しては, 上下成分の周期変化を考慮している Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup> 及び本研究の手法の方が, 上下動を判定に利用していない東京ガス (株) の手法よりも精度が高い. このことから, 上下動の時刻歴の周期変化を考慮することは, 加速度波形から液化化の発生を判定するには重要であると考えられる.

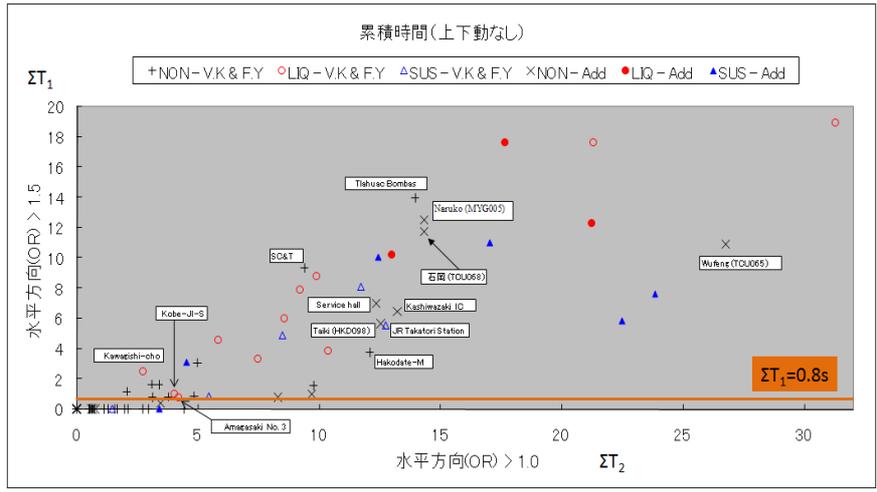


図-10 上下動を考慮しない場合の各地震記録の  $\Sigma T_1$ ,  $\Sigma T_2$

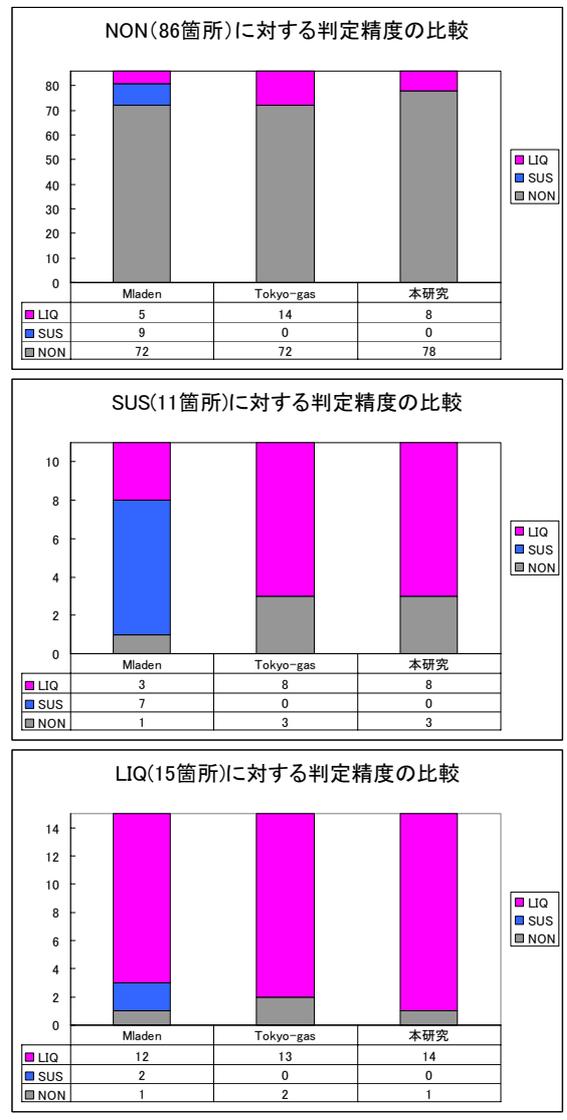


図-11 提案手法,Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup>と東京ガスによる判定結果の比較

Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup> は、地動加速度の周期変化を把握するために、周波数領域での計算（フー

表-2 提案手法の液状化判定精度

| 証拠<br>解析 | NON  | SUS  | LIQ  | 精度(%) |
|----------|------|------|------|-------|
|          | NON  | 78   | 3    |       |
| LIQ      | 8    | 8    | 14   | 73.3  |
| 精度(%)    | 90.7 | 72.7 | 93.3 |       |

リエ変換) を使用している。周波数領域の計算は、周期特性を時刻歴に高精度で把握することができるが、リアルタイムに解析を行うにはあまり適当な手法とは言い難い。本研究の提案手法は、周波数領域での計算を必要としない手法であり、リアルタイムの液状化判別に適したものであると言える。両者の判定精度はほぼ同程度であるとみなせるので、提案手法は地震記録を用いた液状化のリアルタイム判定に妥当なものと考えられる。

表-2に、本提案手法の推定精度をまとめる。全体的には、液状化地点はほぼすべて抽出することができるが、非液状化地点の一部を誤抽出する傾向にあり、やや安全側の判定結果が得られることが分かる。

## 6. 結論

本研究では、地震記録を用いた液状化発生地点の早期把握を目指し、加速度波形の長周期化する特徴をゼロクロス周期を用いて時刻歴で把握することで、液状化判定を行った。Kostadinov and Yamazaki<sup>3)</sup> が使用していた地震データに加えて、1999年以降の地震記録から液状化地点、液状化が疑わしい地点、非液状化地点を文献、現地調査等をもとに精査し、計112記録のデータセットを作成し、液状化判定手法の検討に使用した。

上下動の周期の時間変化を考慮することで、表面波による長周期化が原因となった誤判定がある程度

回避できていることが確認された。本提案手法と周波数領域の計算を用いた既往の手法で判定精度を比較したところ、ほぼ同程度の判定精度が得られていることが明らかとなった。しかしながら、非液化化地点の一部が液化化と誤判定されることもあり、やや安全側の判定結果が得られる傾向にある。

このような誤判定を生じた地点は、上下動の周期特性を考慮しても表面波の影響が除去しきれなかった地点や、強い揺れに見舞われて強非線形性を示した地点であると考えられる。これらの地点を加速度波形の周期特性のみから液化化地点と区別することは難しい。実用的にはボーリングデータなどの地盤データを予め参照し、液化化発生が懸念される地点かどうかを事前に精査した上で、本手法を適用することが望ましいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鈴木崇伸, 清水善久, 中山渉: 液化化地盤における強震記録の特徴について, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1223-1228, 1998.
- 2) 宮島昌克, 野津智, 北浦勝, 山本真樹: 強震記録を用いた液化化検知法に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.647, pp.405-414, 2000.
- 3) Kostadinov, M., Yamazaki, F: Detection of Soil Liquefaction from Strong Motion Records, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 2, 173-193, 2001.
- 4) 清野純史, 土岐憲三, 森下昌浩: 地表面観測波形を用いた液化化発生の判別法について, 地域安全学会論文集 No.1, pp.35-42, 1999.
- 5) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Ioyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K. and Nakayama, W.: Development of Real-Time Safety Control System for Urban Gas Supply Network, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 6) 日本建築学会: 2000年鳥取県西部地震災害調査報告, 2001.
- 7) 地盤工学会: 2003年十勝沖地震地盤災害調査報告書, 2004.
- 8) Ueng, T.S., Chen, M.H. and Li, I.Y.: Preliminary study of soil properties in Yuen-Lin liquefaction areas, *International workshop on annual commemoration of Chi-Chi earthquake, Taipei, Vol.III-Geotechnical Aspect*, pp.131-139, 2000.
- 9) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク Kyoshin Net, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 10) 日本技術開発(株): 鳥取県西部地震写真集, <http://www.jecc.co.jp/topics/kb/tottori/shasin/html/yo-JRyonago.html>
- 11) 境有紀: <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/tkr.htm>
- 12) 飛鳥建設: 2003年十勝沖地震被害調査報告書, 2004.
- 13) 日本技術開発(株): 2007年能登半島地震被害調査報告(速報), [http://www.jecc.co.jp/topics/kb/20070325eq/reconnaissance/20070325\\_Noto\\_report0405.pdf](http://www.jecc.co.jp/topics/kb/20070325eq/reconnaissance/20070325_Noto_report0405.pdf)
- 14) 吉田望, 後藤浩之, 若松加寿江, 福本俊一, 三上武子: 2007年新潟県中越沖地震におけるK-NET柏崎の観測波形について, <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/inform/chuetsuoki/k-net.pdf>
- 15) 防災科学技術研究所強震観測管理室: K-NET柏崎(NIG018)に関して, [http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/K-NET\\_Kashiwazaki.pdf](http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/K-NET_Kashiwazaki.pdf)

## DETECTION OF LIQUEFIED SITES USING ZERO CROSSING PERIOD OF ACCELERATION RECORDS

Osamu KAWAI, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

This paper proposes a method to detect soil liquefaction using the zero-crossing period calculated from acceleration records based on the dataset of 112 sites including records at liquefied, liquefaction-suspicious and non-liquefied sites to understand the occurrence of liquefied sites at an early stage. As for the records at liquefied sites, the predominant period of the horizontal components tends to be longer. On the other hand, the predominant period of the vertical component is not lengthened even at a liquefied site. To reveal these frequency characteristics, the change of the period over the time was calculated from the zero-crossing period. The occurrence of liquefaction was judged by setting threshold values for the horizontal and vertical components. This method is considered to be suitable for liquefaction detection on site within an accelerometer.