

論 説

1586年天正地震の震源断層推定の試み
——液状化履歴地点における液状化可能性の検討から——

阪神・淡路大震災記念人と防災未来センター* 山村紀香
東京大学地震研究所・地震火山史料連携研究機構** 加納靖之

Source Fault Estimation of the 1586 Tensho Earthquake
by Evaluating the Possibility of Liquefaction

Norika YAMAMURA

The Great Hanshin-Awaji Earthquake Memorial
Disaster Reduction and Human Renovation Institution,
1-5-2 Wakinohama-Kaigandori, Chuo-ku, Kobe, 651-0073, Japan

Yasuyuki KANO

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo Collaborative
Research Organization for Historical Materials on Earthquakes and Volcanoes,
The University of Tokyo, 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0032, Japan

(Received February 3, 2020; Accepted August 14, 2020; published online on October 7, 2020)

The Chubu and the Kinki regions in central Japan were widely and seriously damaged by the 1586 Tensho earthquake. The detail of this event is not well understood because reliable descriptions in historical documents for Tensho era are few. Previous researches have provided wide variety of arguments about location of source fault and magnitude of this event, which yield several differing interpretations. In this study, we focus on ground liquefaction which has been not intensively investigated yet for this event. The four areas under consideration involve liquefaction sites discovered in the ruins or inferred from the reliable descriptions. These are the Tonami Plain, Toyama Plain, Nobi Plain and north-east coast of Lake Biwa. We attempt to estimate source fault of this event by evaluating the possibility of liquefaction to seismic ground motion assuming hypothetical source faults. Hypothetical source faults are along the Shokawa fault group, southern part of the Atera fault group and the Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults. The possibility of liquefaction is evaluated by P_L value which is calculated using predicted seismic intensity and borehole data (including N -value and soil data). Predicted seismic intensity is calculated using Estimation Tools for Earthquake Ground Motion by empirical attenuation relations of J-SHIS. Borehole data from 296 boring sites in public database is used. As a result, P_L value is large in all these areas in case of occurrence a single earthquake of $M_j 7.9$ on the Shokawa fault group. It means that the event likely cause liquefaction and can explain liquefaction in all these areas.

Key words: 1586 Tensho earthquake, Liquefaction, Ruins, Borehole data, Historical earthquakes

§1. はじめに

1586年1月18日(天正十三年十一月二十九日)に発

生した天正地震は、近畿地方から東海・北陸地方の広範囲にかけて、甚大な被害をおよぼした内陸地震である[例えば、飯田(1987)]. 有名な被害として、飛騨の帰雲山の山体崩壊による帰雲城の埋没や、美濃の大垣城の倒

* 〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1-5-2

** 〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

壊などが知られる。

天正地震をひとことで表すと、まさに「地震像のハッキリしない地震」[宇佐美・他(2013)]である。なぜなら、この時代は信頼できる被害報告などの公的文書がなく[松浦(2011)],信頼性の高い史料は同時代に記された日記などに限られてしまうからである。そのうえ、被害があまりにも広範囲におよぶため、史料から得られる情報だけではこれらの被害すべてをうまく説明できるような地震像を決めることが難しく、現在に至るまで様々な説が提唱され、震源断層の位置や地震の規模などの推定が大きく異なっている。つまり、「確実な史料から詳細な実像を把握できない分、解釈の幅によっていろいろな断層を震源と推定できた都合のいい地震」[松浦(2011)]ともいえる。とりわけ、天正地震が単独の地震であったか、あるいは複数個の地震であったかについては議論が著しく分かれる点である。例えば、単独の地震として取り扱っている杉山(2011)は、トレンチ調査の結果から庄川断層帯南部の三尾河断層が11世紀以降に活動した可能性を指摘したうえで、被害記録が庄川断層帯に沿うようにして分布することから、庄川断層が天正地震を引き起こした可能性を示唆した。一方、複数個の地震として取り扱っている飯田(1987)は、1月15日、16日と記された越中での地震記録に注目し、16日に法林寺断層でM6.6の天正越中地震、18日に養老断層と伊勢湾断層延長部上でM8.1の天正地震が発生したとした。

天正地震を複数個の地震に分ける考え方は、不明な点の多い天正地震を合理的に説明することができるとして、寒川(2011)など近年広く受け入れられつつある。しかし、多くの震源域を設定すればするほど、天正地震のような広範囲にわたる被害を説明することが容易になるのは自明である。また、飯田(1987)らが提唱する1つ目の地震(天正越中地震)に関する記述は、越中における二次以降の史料(同時代史料以外の編纂物など)のみに登場し、信頼度の高い同時代史料やほかの地域の史料には登場しない。もし、16日に越中側でM6.6の大きな地震が起きていたとするならば、越中以外の地域においても有感の地点があるはずであるが、そのような記述は見られない。

そこで、本研究では、天正地震が単独地震であったと考えた場合の震源断層推定を試み、その端緒として地盤の液状化現象に着目した。液状化現象に着目した理由は二つある。一つ目は、天正地震は史料から得られる情報だけでは全貌をつかむのに不十分な地震であるが、液状化現象であれば史料以外の情報も利用できるからである。具体的には、遺跡発掘調査の際に発見された天正地震時に発生したと考えられる液状化の痕跡である。

二つ目は、歴史地震研究分野において液状化現象を考える際、地盤の情報まで詳細に考慮されてこなかったため、十分な検討を行う必要があるからである。例えば、「歴史地震のための震度表」[宇佐美(2017)]では、液状化に関して、「震度5弱:水田に液状化現象がおり、噴砂・噴水を生じることがある」、「震度5強:地盤によって液状化現象がおり、水・砂・泥を噴出する」と定義されている。しかし、この「噴砂・噴水を生じることがある」や「地盤によって」というような表現は、定性的な表現を含んでおり、評価者によって捉え方が異なる場合がある。

本研究では、歴史地震研究分野における液状化評価方法にボーリング情報などの地盤情報を取り入れることによって、より定量的な被害評価を試みた。具体的には、史料あるいは遺跡から天正地震時に液状化したと考えられる地点を含む地域において、想定される地震動に対する液状化のしやすさを評価し、天正地震の震源断層の推定を試みた。

§2. 天正地震時に液状化したと考えられる地点

日本には、たくさんの考古遺跡が存在しており、発掘調査が行われている。それらの遺跡には、断層・地すべり・液状化現象などの過去の地震による痕跡も多く残されている。あわせて、遺跡には住居跡などの遺構や、土器・木材などの遺物が多く埋蔵されているため、それらの編年や年代決定の結果を手がかりにして地震の発生した年代をおおよそ絞り込むことが可能である。この研究分野は地震考古学と呼ばれる[例えば、寒川(2007)]。

本研究では、史料記述から読み取ることのできる液状化被害だけでなく、遺跡から発掘された液状化の痕跡(噴砂・砂脈)も液状化が発生した地点として取り扱った。天正地震時に液状化したと考えられる遺跡をFig. 1, Table 1に示す。これらの遺跡地点の分布が空間的に南北2つのグループに分けられることから、以降、本稿では富山平野・砺波平野を「北部」、濃尾平野・琵琶湖北東岸地域を「南部」と呼ぶ。

「北部」では、金屋南遺跡や四方背戸割遺跡などから、天正地震時に発生したとされる砂脈が多く発見されている[例えば、富山県教育委員会(2006a)]。また、木舟城について、『三壺記』では「木舟の城を三丈ばかりゆりしづめたり」と記され、『富樫家々譜』では「貴舟の城をゆり崩」と記されており、地すべりや液状化現象を匂わせるような表現がなされている[寒川(2010)]。

「南部」に位置する滋賀県長浜市および岐阜県大垣市では、ポルトガルの宣教師フロイスが著した『フロイス日本史』[松田・川崎(1978)]に液状化が発生したと考え

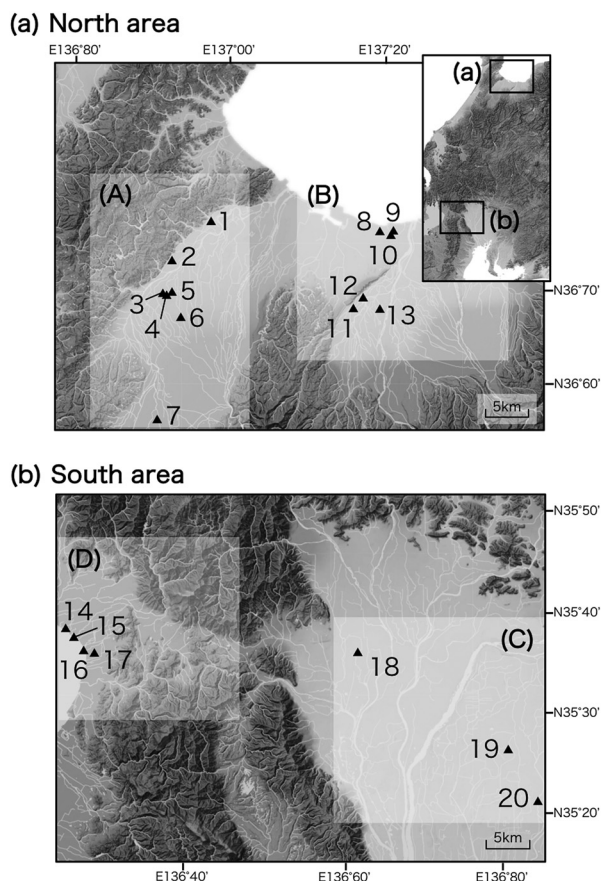


Fig. 1. Distribution of liquefaction sites discovered in the ruins or inferred from the reliable historical descriptions. Triangles indicate liquefaction sites. Numbers in the figures correspond to those in Table 1. Rectangles in the inset in Fig. 1 (a) denote regions of Fig. 1 (a) and Fig. 1 (b). Hatched rectangle shows (A) the Tonami Plain, (B) the Toyama Plain, (C) the Nobi Plain and (D) north-east coast of Lake Biwa.

られる記述が残されている。『フロイス日本史』は、天正年間と同時代に記された数少ない史料である。そのうえ、他の欧州史料に比べて最も詳しく書かれており、編集・翻訳による影響が最も少ないとされ、欧州史料の中では信頼性が高いと評価されている [松浦 (2012)]。『フロイス日本史』には、「近江の国には、〔中略〕長浜という城がある地に、人家千戸を（数える）町がある。（ここでは）地震が起り、大地が割れ、家屋の半ばと多数の人が呑み込まれてしまい、残りの半分の家屋は、その瞬間に炎上し灰燼に帰した。〔中略〕美濃の国には、日本でもきわめて著名な一城（大垣城）がある。〔中略〕その城は山上にあったが、地震が始まると、城と山は下方に崩れ落ちて、その跡には一面の湖が残るのみとなった。〔中略〕これら上記の諸国（美濃、近江のことを指す）で

は、巨大な口を開いた地割れが生じ、万人に恐怖をもたらした。その割れ目からは、黒色を帯びた泥状のものが立ち昇り、ひどく、かつ忌むべき臭気を放ち、そこを通行する者には堪え難いほどであった。」と記されている¹。これらの記述より、長浜城および大垣城周辺では、建物の倒壊だけでなく、液状化が発生した可能性が高いことが示唆される [例えば、飯田 (1987)]。

また、長浜市周辺の琵琶湖湖岸には、複数の湖底遺跡が存在する。湖底遺跡とは、湖岸に作られた住居や集落が廃絶し、湖底に遺物を残した遺跡のことを指し、琵琶湖全体には90ヶ所以上もあるとされる [林・他 (2012)]。湖底遺跡の成因はいくつか考えられるが、地震動によって液状化現象が発生し、地層が湖側へと流出することによって地盤沈下をもたらし、陸が横すべりするように湖に引き込まれる、いわゆる側方流動の考え方が一般的である。長年にわたる水中考古学における検討から、西浜千軒遺跡と下坂浜千軒遺跡は、16世紀後半から17世紀前半までに生じた地盤の沈降によって湖底に水没したとされ、天正地震が原因である可能性が高いと結論づけられている [中川 (2016)]。

§3. 液状化可能性の評価

前述した液状化の発生状況を説明するのに最適な震源断層はどのようなものだろうか。天正地震時に液状化したと考えられる遺跡地点が分布する「北部」「南部」を対象地域とし、地震動予測式によって得られた各地の地震動の強さと地盤の情報を用いて、液状化が生じる可能性の評価を行った。

3.1 手法

3.1.1 距離減衰式による地震動予測

仮定した震源断層で地震が発生した場合、どの程度の地震動が予測されるかを「防災科学技術研究所 J-SHIS 距離減衰式による地震動予測ツール」 [先名・藤原 (2011)] を利用して算出した。この地震動予測ツールは、J-SHIS で公開されている断層パラメータ [防災科学技術研究所 (2020b)] を読み込ませ、任意のマグニチュードを与えることによって、地震動を簡便に予測するものである。

仮定した震源断層は、寒川 (2011) など天正地震の震源断層の候補として検討されているものの中から、活断層の最新活動時期を考慮して、北から、庄川断層帯、阿寺断層帯主部南部、養老-桑名-四日市断層帯の3つとした (Fig. 2)。活断層の最新活動時期とマグニチュードは主要活断層帯の長期評価 [地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2019)] の概要の値を参照し (Table 2)、計算に

¹ 原文ママ。

Table 1. Liquefaction sites discovered in the ruins or inferred from the reliable historical descriptions.

No.	Ruin	Phenomena	References
1	岩坪岡田島遺跡	地割れ	財団法人富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所 (2007)
2	寺谷内遺跡	地すべり	高岡市教育委員会 (2009)
3	石名田木舟遺跡	噴砂, 砂脈*	福岡町教育委員会 (1997)
4	木舟城跡	地すべり, 噴砂, 砂脈	福岡町教育委員会 (2002)
5	開禱大滝遺跡	噴砂, 砂脈*	財団法人富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所 (2000)
6	御館山館跡	噴砂, 砂脈*	富山県砺波市教育委員会 (2014)
7	梅原落戸遺跡	噴砂, 砂脈	埋文関係救援連絡会議埋蔵文化財研究会 (1996)
8	打出遺跡	噴砂, 砂脈*	富山市教育委員会 (2006b)
9	四方荒屋遺跡	噴砂, 砂脈	富山市教育委員会 (2014)
10	四方背戸割遺跡	噴砂, 砂脈*	富山市教育委員会 (1999), 富山市教育委員会 (2006c)
11	友坂遺跡	噴砂, 砂脈	婦中町教育委員会 (1997)
12	金屋南遺跡	噴砂, 砂脈*	富山市教育委員会 (2006a)
13	鵜坂 I 遺跡	噴砂, 砂脈*	婦中町教育委員会 (1999)
14	西浜千軒遺跡	側方流動	中川 (2016), 『フロイス日本史』
15	長浜城跡	側方流動	中川 (2016), 『フロイス日本史』
16	下坂浜千軒遺跡	側方流動	林・他 (2012), 『フロイス日本史』
17	下坂中町遺跡	噴砂, 砂脈	丸山 (2000), 中川 (2016)
18	大垣城跡	液状化	『フロイス日本史』
19	東畑廃寺跡	噴砂, 砂脈**	埋文関係救援連絡会議埋蔵文化財研究会 (1996)
20	清洲城跡	噴砂, 砂脈***	財団法人愛知県埋蔵文化財センター (1994)

* 1586 Tensho earthquake or (and) 1858 Hietsu earthquake

** 1586 Tensho earthquake or (and) 1498 Meio Tokai earthquake

*** 1586 Tensho earthquake or (and) 1891 Nobi earthquake

使用した断層パラメータは電子付録 Table S1 にまとめた。

得られた各地域の計測震度から藤本・翠川 (2010) を用いて地表最大加速度を算出した。なお、ここでは長期評価によるマグニチュードが気象庁マグニチュード M_j と等価であるとし、気象庁マグニチュード M_j とモーメントマグニチュード M_w の変換には宇津 (1982) を使用した。

3.1.2 液状化可能性指数 P_L 値の算出

地盤による液状化しやすさの違いを調べるため、遺跡または史料から天正地震時に液状化したと考えられる地点周辺で掘削されたボーリング地点全 296 点において、液状化可能性指数 P_L 値を算出した。 P_L 値とは、地盤の強度を表す N 値や土質区分などから算出される各深度の「動的剪断強度比 R 」と水平震度や全上載圧・有効上載圧などから算出される各深度の「地震時剪断応力比 L 」から求まる液状化対象層ごとの液状化に対する抵抗率 F_L (1 式) を、地表面からの深度 z (m) を考慮して積分することによって算出される液状化しやすさを表す値である (2 式)。算出方法は、 P_L 法 [日本道路協会 (2012, 2015)] を用いた。なお、土質定数は財団法人建設工学研究所 (1999) を用い、地下水位は一律地下 1m と固定した。

$$F_L(z) = \frac{R(z)}{L(z)} \quad (1)$$

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L(z)) \cdot (10 - 0.5z) dz \quad (2)$$

得られた P_L 値を平易に評価するため、岩崎・他 (1980) の基準を用い、液状化可能性大・中・小・なしの 4 段階に分類を行った (Table 3)。

ボーリング地点は、液状化発生地点と同一地点に存在することは稀である。各液状化発生地点の最近傍のボーリング地点は、概ね 8km 以内におさまったため、液状化発生地点から 8km 以内に存在する全てのボーリング地点で代用することとした (Fig. 3)。それぞれのボーリングデータの閲覧および取得には「ジオ・ステーション (Geo-Station)」 [防災科学技術研究所 (2019)] 内の土木研究所・滋賀県土木交通部のデータを利用した。

3.2 結果

3.1.1 で述べた地震動予測ツールによって求められた予測震度分布図を Fig. 4 に示す。既往研究である宇佐美・他 (2013) の震度分布図では、震源が岐阜県南部で、震度 6 の地域が富山県北部から伊勢湾まで広く及んでいるのに対して、本研究の予測震度分布図では震度 6 の地域の広がり小さくなっていることがわかる。求めた予測震度から換算した地表最大加速度と各地点におけるボーリング情報をもとにして、3.1.2 で述べた方法によっ

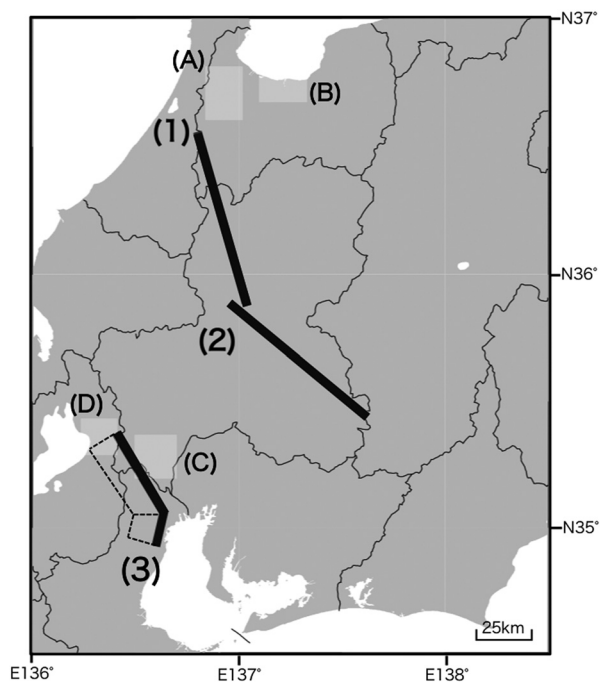


Fig. 2. Hypothetical fault models of the 1586 Tensho earthquake assumed to calculate the possibility of liquefaction along (1) the Shokawa fault group, (2) southern part of the Atera fault group, and (3) the Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults. Thick lines indicate upper edge of the hypothetical fault models. Hatched rectangle is the same as in Fig. 1.

て求めた各地点での P_L 値および液状化可能性を Fig. 5 に示す。それぞれの棒グラフは個々のボーリング地点に対応している。計算したボーリング地点は、「北部」が 110 地点、「南部」が 186 地点の合計 296 地点である。また、液状化可能性ごとに分類したボーリング地点の合計個数を Fig. 6 にまとめた。棒グラフ上部は「北部」、下部は「南部」の合計地点数を示している。以下では、仮定した震源断層ごとに得られた結果について書き示す。

庄川断層帯は、仮定した 3 つの震源断層の中で一番北に位置する。そのため、庄川断層帯から近い「北部」では、Fig. 4 (a) のように、震度 5 強～6 弱と強い揺れが予測された。それだけでなく、庄川断層帯から遠く離れた「南部」においても、震度 5 弱～5 強と強い揺れが予測された。そのため、 P_L 値は「北部」「南部」の両地域において大きくなる傾向がみられた (Fig. 5 (a))。Fig. 6 (a) のように、液状化可能性が大の地点が「北部」で 110 地点中 17 地点、「南部」で 186 地点中 48 地点にまで達した。また、液状化可能性が中の地点も「北部」で 110 地点中 52 地点、「南部」で 186 地点中 47 地点と多くみられた。これらから、庄川断層帯で地震が発生したと仮定した場合、「北部」「南部」の両地域において液状化しやすい条件をみたとはいえる。

阿寺断層帯主部南部は、「北部」と「南部」から同程度の距離にある。Fig. 4 (b) のように、「北部」では大部分が震度 4 となり、砺波平野の一部で震度 5 弱が予測され、庄川断層帯を震源断層とした場合よりは弱い揺れの

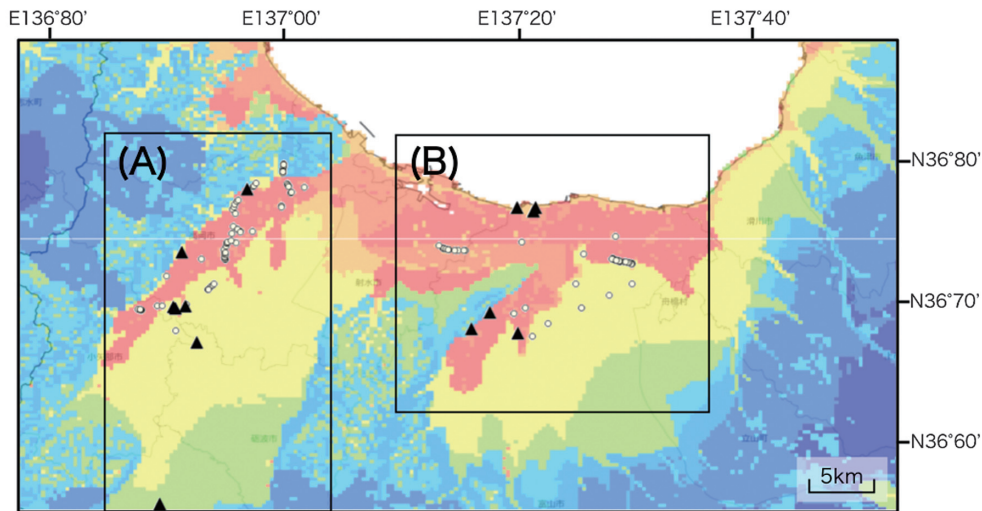
Table 2. Magnitude and age of the last faulting of active faults (The Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2019).

Fault name	M_f	Age of the last faulting
(1) Shokawa fault group	Around 7.9	11-16 centuries
(2) Southern part of Atera fault group	Around 7.8	the 1586 Tensho Earthquake
(3) Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults	Around 8.0	13-16 centuries

Table 3. Classification for P_L value (Iwasaki *et al.*, 1980). “大”, “中”, “小” and “なし” indicate classification of possibility and correspond to surely, likely, unlikely and hardly, respectively.

P_L value	Possibility of liquefaction	Risk of liquefaction
$15 < P_L$	大	「液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避。」
$5 < P_L \leq 15$	中	「液状化危険度が高い。重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。」
$0 < P_L \leq 5$	小	「液状化危険度は低い。特に重要な構造物の設計に際しては、より詳細な調査が必要。」
$P_L = 0$	なし	「液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。」

(a) North area



(b) South area

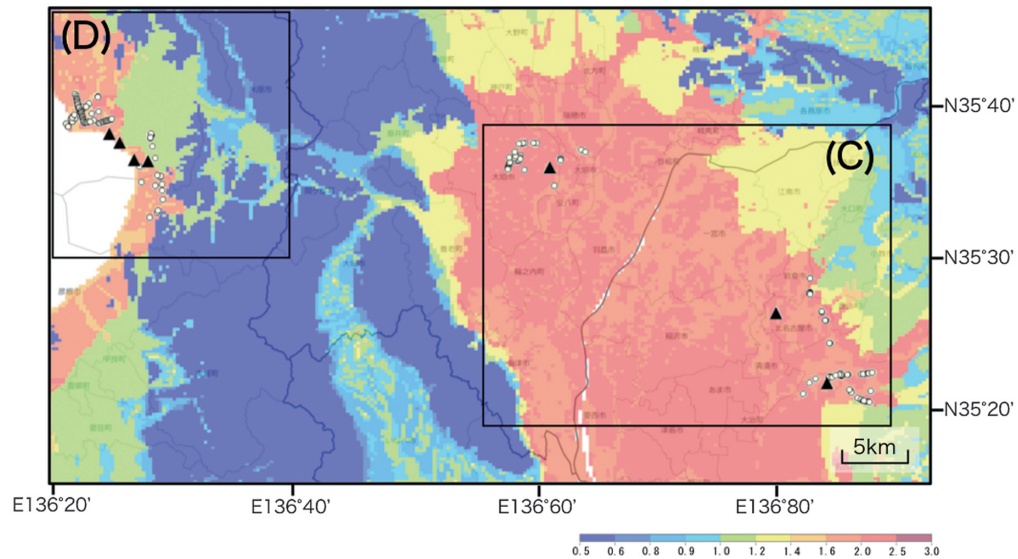


Fig. 3. Sites of borehole using in this study. White circles are sites of borehole. Triangles indicate sites of ruins. The background of the map is Site Amplification Factor (NIED, 2020a) and GSI Tiles (GSI, 2020). Rectangle is the same as in Fig. 1.

予測となった。「南部」では濃尾平野が震度5強、琵琶湖北東岸地域が震度5弱と強い揺れが予測された。その結果、 P_L 値は「北部」ではほとんどのボーリング地点において0と小さい値を示したが、「南部」では庄川断層帯を震源断層とした場合と同様に大きな値となった (Fig. 5 (b)). Fig. 6 (b) のように、「北部」では液状化可能性なしの地点が110地点中105地点と、ほとんどの地点で液状化しにくい条件となった。一方、「南部」では液状化可能性が大の地点が186地点中49地点となり、「北部」と「南部」で異なる傾向がみられた。

養老-桑名-四日市断層帯は、仮定した3つの震源断層

の中で最も南に位置し、「南部」に最も近い断層である。そのため、Fig. 4 (c) のように、「南部」では震度6強と非常に強い揺れが予測される地点が多くなった。一方、「北部」では震度4以下の地点が多く予測された。それゆえ、 P_L 値は「北部」のほとんどのボーリング地点において0となったが、「南部」では非常に大きな値を示した (Fig. 5 (c)). この「北部」と「南部」での異なる傾向は、阿寺断層帯主部南部を震源断層とした場合にもみられたが、養老-桑名-四日市断層帯を震源断層とした場合の方がより顕著であった。Fig. 6 (c) のように、「南部」では阿寺断層帯主部南部を震源断層とした場合よりも液状化

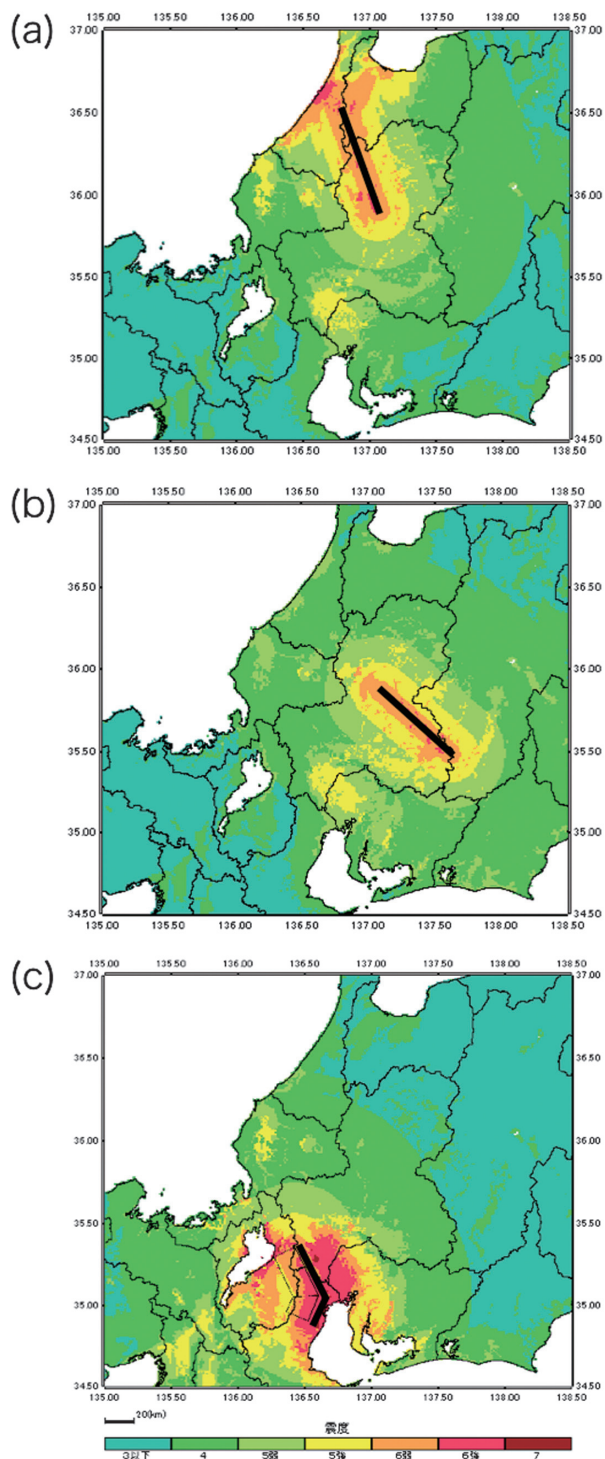


Fig. 4. Predicted seismic intensity maps for hypothetical source fault along (a) the Shokawa fault group (M_j 7.9), (b) southern part of the Atera fault group (M_j 7.8), and (c) the Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults (M_j 8.0).

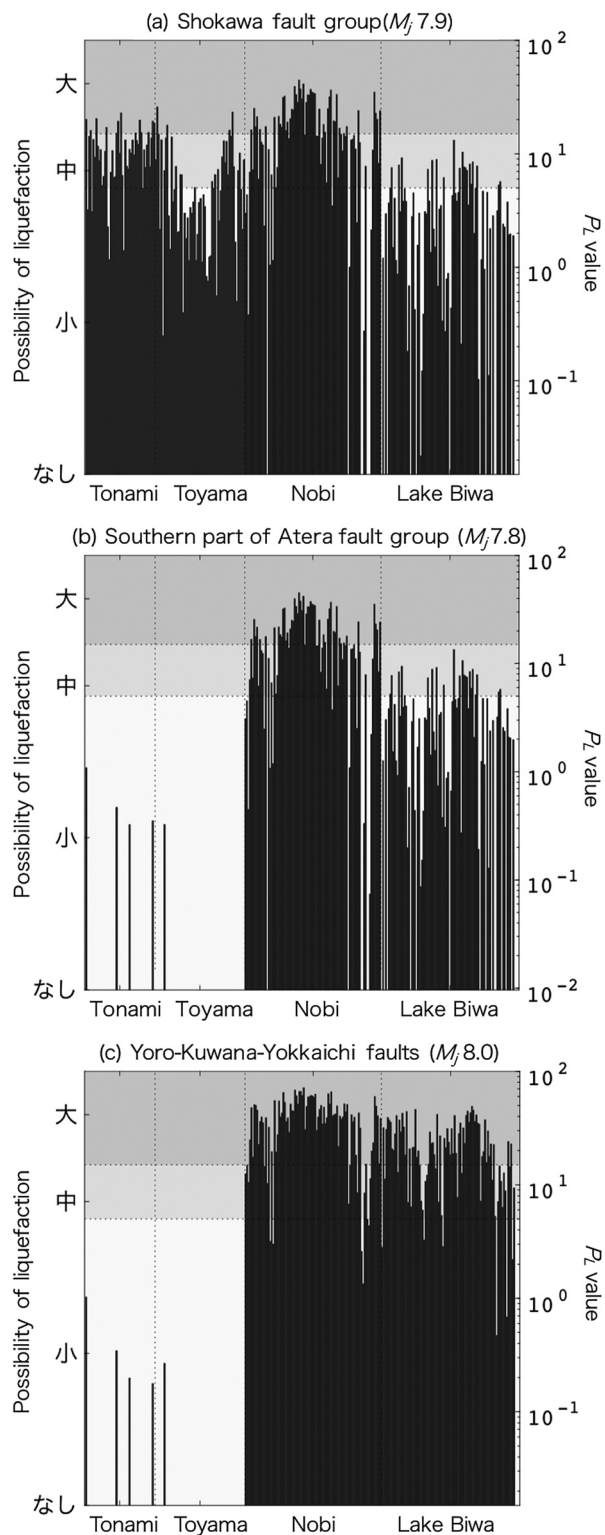


Fig. 5. P_L values and the possibilities of liquefaction in the boreholes for hypothetical source fault along (a) the Shokawa fault group (M_j 7.9), (b) southern part of the Atera fault group (M_j 7.8), and (c) the Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults (M_j 8.0). Each bar graph corresponds to sites of borehole. Areas of the Tonami, Toyama, Nobu and Lake Biwa are shown in Fig. 1. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

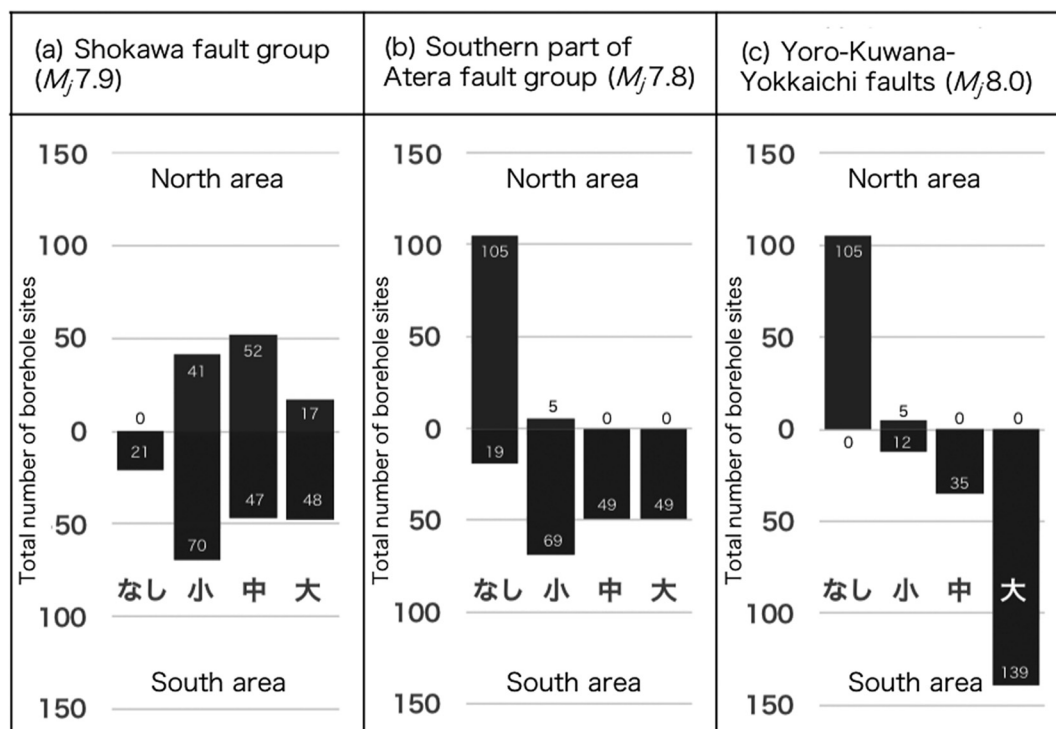


Fig. 6. Total number of borehole sites classified by possibility of liquefaction for hypothetical source fault along (a) the Shokawa fault group (M_j 7.9), (b) southern part of the Atera fault group (M_j 7.8), and (c) the Yoro-Kuwana-Yokkaichi faults (M_j 8.0). The upper and lower parts of the graph show the number of boreholes in north and south area, or Fig. 1 (a) and Fig. 1 (b), respectively. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

可能性が大の地点が90地点も増え、186地点中139地点となった。また、「北部」では液状化可能性なしの地点が110地点中105地点となった。

これらの結果をまとめると、以下の3点を指摘することができる。

- (i) 仮定した3つの震源断層すべての場合において、「南部」では P_L 値が大きくなり、液状化可能性の高い地点が多くなった。これは、たとえ震源断層が遠く離れていて、震度が比較的小さくなったとしても、若松(2018)で液状化しやすいと指摘されている砂(粒径0.075~2mm)を含む土が多く分布しているような「南部」では、地盤条件の寄与によって液状化しやすい条件をみ出す場合があることを示している。
- (ii) 阿寺断層帯主部南部で M_j 7.8の地震、あるいは養老-桑名-四日市断層帯で M_j 8.0の地震が発生した場合、「北部」における P_L 値が小さくなり、液状化可能性なしまたは小の地点のみとなった。つまり、阿寺断層帯主部南部、あるいは養老-桑名-四日市断層帯における地震では、「北部」の液状化発生を説明しにくいといえる。
- (iii) 庄川断層帯で M_j 7.9の地震が発生したと仮定した場

合、「北部」「南部」とともに P_L 値が大きくなり、液状化可能性の高い地点が多くみられた。これは、庄川断層帯における地震の場合、「北部」「南部」の両地域の液状化発生を一度に説明することができる可能性を示している。

§4. 議 論

本章では、「北部」「南部」の液状化発生を説明しうる可能性がある庄川断層帯に対して、これまでに得られた結果の妥当性を議論するため、計算に用いる仮定を変え、3.1で述べた手順で計算を行った結果を記す。 P_L 値の大きさを大きく左右する原因として考えられるものとして、地下水位の影響と地震の規模の影響の2項目を考えた。各項目において、得られた結果にどの程度の影響を与えるかについて検討し、液状化現象以外の被害記述とどの程度整合性があるかについても検討を行った。

4.1 地下水位の影響

ここまでの液状化可能性の評価では地下水位を1mに固定していた。一般的に、地下水位が高いほど液状化は発生しやすくなる[若松(2018)]。天正地震発生当時の地下水位を知ることは困難であるため、各ボーリング

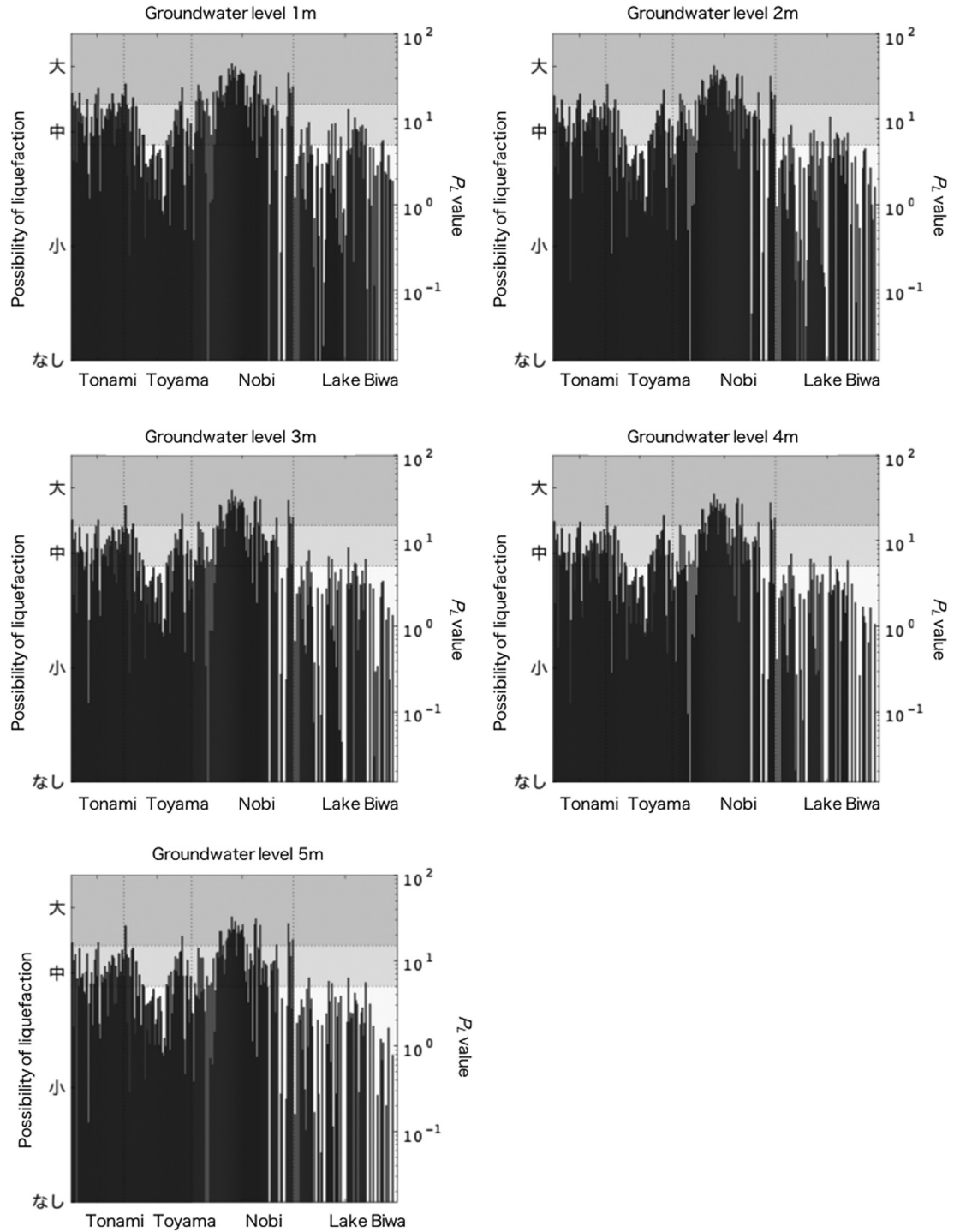


Fig. 7. P_L values and the possibilities of liquefaction for hypothetical source fault along the Shokawa fault group ($M; 7.9$) with different groundwater level. Tonami, Toyama, Nobu and Lake Biwa are shown in Fig. 1. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

地点の地下水位を変えた時に、 P_L 値がどの程度変化し、それに伴って液状化可能性の割合が変わるのかについて検討を行った。ここでは、地下水位を 1m から 5m まで 1m 刻みで仮定し、それぞれの場合における P_L 値を算出した。なお、 P_L 法の計算は土層ごとに行っているた

め、計算で使用している地下水位が一番近い土層境界に近似した。

地下水位を変化させた場合における、各地点での P_L 値および液状化可能性を Fig. 7、その分類ごとの合計個数を Table 4 にまとめた。地下水位の低下にともなっ

Table 4. Total number of borehole sites classified by the possibility of liquefaction for hypothetical source fault along the Shokawa fault group ($M_j 7.9$) with different groundwater level. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

		Groundwater level				
		1 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Possibility of liquefaction	大	65	47	36	31	30
	中	99	105	104	101	97
	小	111	116	121	123	124
	なし	21	28	35	41	45

て、液状化可能性が大の地点数が少しずつ減少し、液状化可能性なしの地点数が少しずつ増加していることが読み取れる。

地下水位を低く仮定することによって、液状化可能性が大の地点はある程度減少するものの、すべての地点において液状化可能性なしとなるような大幅な減少はみられなかった。これらから、たとえ地下水位が5mであったとしても、庄川断層帯で $M_j 7.9$ の地震が発生した場合に、「北部」「南部」ともに液状化可能性が高いという傾向は変わらないといえる。他の2つの断層で地震が発生した場合にも同様の検討を行なったところ、地下水位の違いによって結論が変わることはなかった（電子付録 Fig. S1, Fig. S2）。つまり、地下水位の高低は、前章の結果に大きな影響をおよぼさないと考えてよい。

4.2 地震の規模の影響

3.1で仮定した地震の規模 M_j は、地震本部の長期評価のマグニチュードと等価としたものであり、あくまでひとつの可能性であるため、過去に発生した地震を再現しているわけではない。地震の規模を変化させた場合に、 P_L 値および液状化可能性がどのように変化するのか、そして3.2で述べた結果がどの程度の地震の規模まで有効であるのかについて検討を行った。ここでは長期評価のマグニチュードを最大規模と仮定し、それより小さいマグニチュードのみ検討を行った。

庄川断層帯において、地震の規模を小さくした場合の P_L 値および液状化可能性を Fig. 8 に示し、その個数を Table 5 にまとめた。他の2つの断層については電子付録 Fig. S3, Fig. S4 を参照されたい。庄川断層帯で $M_j 7.9$ の地震が発生した場合は「北部」「南部」ともに液状化可能性の高い地点が多く見受けられており、この傾向は $M_j 7.7$ の場合まで同様で、液状化可能性が大の地点が1点、中の地点が8点減り、液状化可能性なしの地点が9点増えるのみであった。そのため、全体的な液状化可能性にはあまり変動がないといえる。一方、 $M_j 7.7$ より規

模を小さくすると、各地点での地震動がさらに小さくなるため、 P_L 値が減少していくのが読み取れる。 $M_j 7.5$ の場合は、琵琶湖北東岸地域において液状化可能性がほとんどなくなり、琵琶湖北東岸地域の液状化発生を説明することが難しくなった。それに加えて、 $M_j 7.0$ および $M_j 6.7$ の場合は、富山平野・濃尾平野においても液状化可能性が低くなり、琵琶湖北東岸地域・富山平野・濃尾平野の液状化発生を説明することが難しくなった。さらに $M_j 6.4$ と小さくすると、どの地域においても、液状化可能性がほとんどなくなっていくのがわかる。

これらより、 $M_j 7.5$ 以下の場合には、液状化可能性の低い地域が存在することから、各地域における液状化発生を庄川断層帯の単独の地震で説明することは困難であるといえる。一方、庄川断層帯において $M_j 7.7$ 程度以上の地震であれば、「北部」「南部」ともに液状化可能性が高いことから、「北部」「南部」の液状化発生を単独の地震で説明することが可能である。

なお、地震動の計算には、前述した地震動予測ツールを使用しており、あくまで距離減衰式を用いた簡便法による予測震度結果であるため、破壊開始点やアスペリティの位置を考慮する詳細法による計算では、予測震度が変わることには注意が必要である。また、震源断層パラメータのスケージングの観点からは、地震の規模が変化するとそれに伴って震源断層の長さも変化するが、ここでは、断層の長さを変えず M_j のみを変化させ、各ボーリング地点での震度を計算している。震源のスケージング則にしたがって震源断層の長さを変化させる立場に立つならば、震源断層から各ボーリング地点までの断層最短距離を一定として、震度を評価していることになる。そのため、Fig. 8, Table 5 における結果は、庄川断層帯でそれぞれの規模の地震が震源断層上のどこかで発生した場合における最大の影響を表していることになる。

4.3 液状化現象以外の被害記述との整合性

本節では、前章までに得られた結果と液状化現象以外

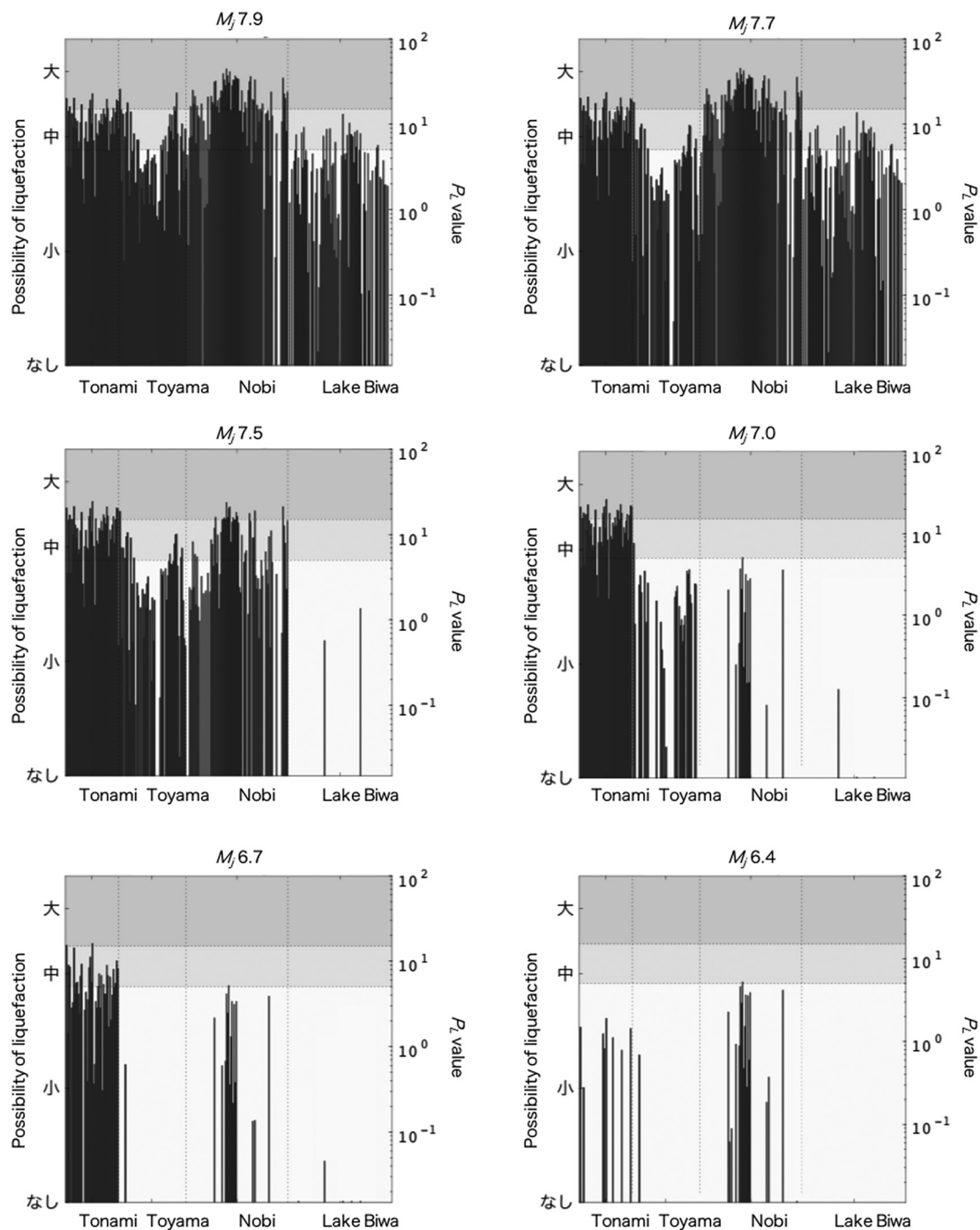


Fig. 8. P_L values and the possibilities of liquefaction for hypothetical source fault along the Shokawa fault group (M_j 7.9) with magnitude of the earthquake. Tonami, Toyama, Nobi and Lake Biwa are shown in Fig. 1. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

の被害記述との整合性について検討する。具体的には、「北部」と「南部」の液状化発生を一度に説明することができる可能性をもつ庄川断層帯 (M_j 7.9), およびあわせて検討した阿寺断層帯主部南部 (M_j 7.8), 養老-桑名-四日市断層帯 (M_j 8.0) において地震がそれぞれ発生した場合の予測震度と、史料から読み取れる液状化現象以外の被害

記述から推定した震度の比較を行う。

Table 6 に同時代史料による天正地震の被害とそれらから推定される震度をまとめた。被害から震度への推定は「歴史地震のための震度表」[宇佐美 (2017)] を用いた。表内で括弧書きにしている被害については、岡崎城の普請の解釈 [例えば、八木・他 (1984)] などの記述内容

Table 5. Total number of borehole sites classified by the possibility of liquefaction for hypothetical source fault along the Shokawa fault group ($M_j7.9$) with different magnitude of the earthquake. “大”, “中”, “小” and “なし” are the same as in Table 3.

		Magnitude of the earthquake					
		$M_j7.9$	$M_j7.7$	$M_j7.5$	$M_j7.0$	$M_j6.7$	$M_j6.4$
Possibility of liquefaction	大	65	64	31	19	2	0
	中	99	91	66	26	22	1
	小	111	111	79	51	43	28
	なし	21	30	120	200	229	267

Table 6. Damage Descriptions in historical documents for Tensho era and estimated seismic intensity.

Area	Damage in historical documents	Seismic intensity
三河	家屋倒壊, 死者多数 ¹ . (岡崎城で被害か ² .)	5-6
尾張	死者多数 ³ . 長島城の倒壊, 焼失, 周辺は川のようになった ⁴ . 甚目寺の本堂倒壊 ⁵ .	5-6
伊勢	家屋倒壊, 死者多数 ^{6,7} . 亀山城倒壊 ^{8,9} . 徳蓮寺堂塔ゆり曲がる ¹⁰ .	4-6
美濃	死者多数 ³ . 大垣城が崩落し, 地割れから泥状物噴出 ^{8,9} . 水沢上で山崩れ ¹¹ .	5-6
飛騨	帰雲山の山体崩壊によって, 川が堰き止められ大洪水が発生, 帰雲城が埋没し, 城主の内ヶ島氏理とその一族家臣らすべて死亡 ^{11,12} . 小白河, 丸山においても山崩れ ¹¹ .	6
近江	別して大地震 ¹³ . 死者多数 ^{3,7} . 佐和山, 長浜で被害 ¹¹ . 長浜で家屋倒壊と火災被害, 地割れから泥状物噴出 ^{8,9} . 守山市小浜町の天満宮崩れる ¹² .	5-6
山城	三十三間堂の仏像およそ 600 体倒れる ¹³ . 東寺の講堂十間ほど瓦崩れ, 大日不動般若菩薩頭口落ちかかり, 千手堂の柱北へ五分そり歪み, 観頂院破損し壁のみ下に崩れる ¹⁴ . 壬生寺の堂倒れる ^{7,8} . 吉田神社破損 ⁷ .	4-5
大和	興福寺の小塔院の築垣・石塔崩れ, 寮光院・慈恩院の厨子が崩れる ³ .	4
和泉	大地震だがさほどではない ¹³ . 堺で 30 以上の倉庫倒壊し, 15~20 人死亡 ⁸ , 家屋 60 戸倒壊 ⁹ .	4-5
摂津	大地震だがさほどではない ¹³ . 大坂で美濃殿の館が倒壊 ⁸ .	4-5
若狭	(津波のため人家流出か ^{7,8} .)	—
越前	別して大地震 ¹³ . 北ノ庄・敦賀が亡所になった ¹¹ . (津波のため人家流出か ⁷ .) 佐竹出羽守の妹の私宅が崩壊 ⁷ .	5-6
丹後	(津波のため人家流出か ⁷ .)	—
加賀	別して大地震 ¹³ .	5
河内	大地震だがさほどではない ¹³ .	4

参考史料 (上付き数字に対応. 1-11, 13-14 は飯田 (1987), 12 は萩原・他 (1989) を参照)

- | | | |
|-------------|----------------|--------------|
| 1: 『常光寺年代記』 | 6: 『外宮遷宮召立文記』 | 11: 『長滝寺文書』 |
| 2: 『家忠日記』 | 7: 『兼見卿記』 | 12: 『天満宮棟札』 |
| 3: 『多聞院日記』 | 8: 『フロイス日本史』 | 13: 『宇野主水日記』 |
| 4: 『当代記』 | 9: 『イエズス会日本年報』 | 14: 『東寺執行日記』 |
| 5: 『甚目寺文書』 | 10: 『野代古跡遺書』 | |

の正誤に関して, 諸検討が行われているものであり, 震度推定には使用していない。

養老-桑名-四日市断層帯 ($M_j8.0$) を震源とした場合に, Fig. 4 (c) の予測震度と Table 6 の推定した震度を比較すると, 畿内の震度は概ね整合性があるが, 推定した震度では伊勢湾周辺はやや過小評価, 岐阜県・北陸地方では過大評価となり, 全体として異なる結果となった。

そのため, 養老-桑名-四日市断層帯 ($M_j8.0$) を震源とする単独の地震では, 「北部」周辺での被害を説明することが困難であるといえる。また, 阿寺断層帯主部南部 ($M_j7.8$) を震源とした場合に, Fig. 4 (b) の予測震度と Table 6 の推定した震度を比較すると, 推定した震度では土砂崩れのあった帰雲山が位置する岐阜県北部や北陸地方では大きくなるのが分かり, 「北部」周辺での被害をやや

説明しにくい状況となった。

一方、庄川断層帯 ($M_j 7.9$) を震源とした場合には、飛騨や美濃、越前、尾張、三河、伊勢などの震度は概ね整合性がみられた。しかし、加賀では、Fig. 4 (a) に震度 6 弱が一部みられるが、推定した震度では震度 5 となり、過小評価となった。これは、加賀での被害記録がほとんど存在せず、「大地震」という情報しかないため、的確な評価ができず、震度 5 と推定せざるを得なかったためである。一方、山城や摂津などの畿内では、Fig. 4 (a) で震度 3~4 程度であるが、推定した震度では震度 4~5 となり、過大評価となった地域があった。これらについては、庄川断層帯 ($M_j 7.9$) において地震が発生した場合の予測震度分布では被害を説明しにくい地域であるかもしれない。もちろん、局所的に揺れが大きくなる場合や、被害のあった建物などが脆弱であった影響も捨てきれないため、史料記述のさらなる吟味や液状化現象以外の被害についての評価方法を充実させた上で再度検討することが必要になってくるであろう。

以上から、本研究の結果である「庄川断層帯で $M_j 7.9$ の地震が発生した場合」は、液状化現象以外の被害記述に関しても、多少の過大評価・過小評価はみられるものの、他の 2 つの断層を震源とする場合に比べてより整合的であるといえる。

§5. ま と め

本研究では、史料あるいは遺跡から天正地震時に液状化したと考えられる地点を含む地域において、想定される地震動に対する液状化可能性を評価することによって、天正地震の震源断層推定を試みた。その結果、庄川断層帯で $M_j 7.7$ 程度以上の地震が発生した場合に、天正地震時に液状化したと考えられる地点周辺のボーリング地点において、液状化可能性が高くなる傾向がみられた。このことは、天正地震が庄川断層帯における単独地震であった場合、砺波平野・富山平野・濃尾平野・琵琶湖北東岸地域の液状化の発生を一度の地震で説明することができる可能性を示すものである。さらに、本研究における液状化可能性の評価において、地下水位の影響は結果にあまり寄与しないことを確かめた。一方、地震の規模が小さくなる場合には液状化発生を説明しにくくなることを示し、液状化現象以外の被害記述との整合性についても検討を行った。また、1 章で述べたように、従来の歴史地震研究分野における液状化評価方法は被害と震度の関係が主であったが、本結果は震度だけでなく地盤情報にも少なからず依存することを示唆している。

謝 辞

本稿は筆者（山村）の修士論文をまとめたものです。地図作成には「川だけ地形地図」[Ground Interface (2019)], 「QGIS」[QGIS Development Team (2019)], 「地理院タイル (白地図)」[国土地理院 (2020)], 「J-SHIS Map」[防災科学技術研究所 (2020a)] を使用しました。匿名の 2 名の査読者と編集担当委員の原田智也氏からの貴重なコメントにより本稿は改善されました。記して感謝いたします。

文 献

- 防災科学技術研究所, 2019, ジオ・ステーション (Geo-Station), <<https://www.geo-stn.bosai.go.jp/>>, (参照 2019-11-12).
- 防災科学技術研究所, 2020a, J-SHIS Map, <<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>>, (参照 2020-04-16).
- 防災科学技術研究所, 2020b, J-SHIS からダウンロードできるデータ, <<http://www.j-shis.bosai.go.jp/download/>>, (参照 2020-06-19).
- 婦中町教育委員会, 1997, 富山県婦中町友坂道跡発掘調査報告Ⅲ, 30 pp.
- 婦中町教育委員会, 1999, 富山県婦中町県営公害防除特別土地改良事業に係る埋蔵文化財包蔵地試掘調査報告書, 60 pp.
- 藤本一雄・翠川三郎, 2010, マグニチュードの影響を考慮した計測震度と地震動強さ指標の関係式, 日本地震工学会論文集, 10, 2, 1-10.
- 福岡町教育委員会, 1997, 石名田木舟遺跡発掘調査報告書—県指定史跡木舟城跡隣接地における発掘調査—, 福岡町埋蔵文化財報告書, 6, 20 pp.
- 福岡町教育委員会, 2002, 木舟城跡発掘調査報告—範囲確認調査報告—, 108 pp.
- Ground Interface, 2019, 川だけ地形地図, <<https://www.gridscapes.net/>>, (参照 2019-10-21).
- 萩原尊禮・藤田和夫・山本武夫・松田時彦・大長昭雄, 1989, 続古地震—実像と虚像, 東京大学出版会, 434 pp.
- 林 博通・釜井俊孝・原口 強, 2012, 地震で沈んだ湖底の村 琵琶湖湖底遺跡を科学する, サンライズ出版, 137 pp.
- 飯田汲事, 1987, 天正大地震誌, 名古屋大学出版会, 522 pp.
- 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進, 1980, 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, 28, 4, 23-29.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2019, 主要活断層帯の長期評価の概要, <http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_pref.pdf>, (参照 2019-11-2).
- 国土地理院, 2020, 地理院タイル一覧, <<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>>, (参照 2020-6-8).
- 埋文関係救援連絡会議埋蔵文化財研究会, 1996, 発掘された地震痕跡, 825 pp.

- 丸山雄二, 2000, 長浜城下町の構造, 長浜文化財シンポジウム『近世城下町の諸相』, 12-21.
- 松田毅一・川崎桃太, 1978, フロイス日本史 5, 中央公論社, 195-201.
- 松浦律子, 2011, 天正地震の震源域特定: 史料情報の詳細検討による最新成果, 活断層研究, **35**, 29-39.
- 松浦律子, 2012, 天正地震に関する欧州史料の素性と確実な内容, 地震, **2**, **65**, 1-7.
- 中川 永, 2016, 西浜千軒遺跡—琵琶湖湖底遺跡の調査・研究一, サンライズ出版, 99 pp.
- 日本道路協会, 2012, 道路橋示方書 (V 耐震設計編)・同解説, 丸善出版, 318 pp.
- 日本道路協会, 2015, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料, 丸善出版, 302 pp.
- QGIS Development Team, 2019, QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project., <<http://qgis.osgeo.org>>, (参照 2019-1-21).
- 寒川 旭, 2007, 地震の日本史 大地は何を語るのか, 中公新書, 276 pp.
- 寒川 旭, 2010, 秀吉を襲った大地震 地震考古学で戦国史を読む, 平凡社, 277 pp.
- 寒川 旭, 2011, 天正地震の地震考古学, 活断層研究, **35**, 67-73.
- 先名重樹・藤原広行, 2011, 地震動予測地図作成ツールの開発, 防災科学技術研究所研究資料, **354**, 150 pp.
- 杉山雄一, 2011, 御母衣断層系と1586年天正地震, 活断層研究, **35**, 57-65.
- 高岡市教育委員会, 2009, 寺谷内遺跡・寺谷内横穴墓調査報告—平成19年度, 岸谷川砂防改良事業に伴う調査一, 高岡市埋蔵文化財調査報告, **19**, 26 pp.
- 富山県砺波市教育委員会, 2014, 御館山館跡発掘調査報告—砺波平野における災害痕跡を伴う中世城館の調査一, 86 pp.
- 富山市教育委員会, 1999, 富山市四方背戸割遺跡発掘調査報告書, 28 pp.
- 富山市教育委員会, 2006a, 富山市金屋南遺跡発掘調査報告書Ⅲ—金屋企業団地造成に伴う埋蔵文化財発掘調査報告(3)一, 富山市埋蔵文化財調査報告, **5**, 169 pp.
- 富山市教育委員会, 2006b, 富山市打出遺跡発掘調査報告書—一般県道四方新中茶屋線住宅基盤整備事業に伴う発掘調査報告一, 富山市埋蔵文化財調査報告, **7**, 205 pp.
- 富山市教育委員会, 2006c, 富山市四方背戸割遺跡発掘調査報告書—一般国道415号線道路改築工事に伴う埋蔵文化財発掘調査報告一, 富山市埋蔵文化財調査報告, **11**, 82 pp.
- 富山市教育委員会, 2014, 富山市四方荒屋遺跡発掘調査報告書—富山北消防署和合出張所新築工事に伴う埋蔵文化財発掘調査報告書一, 富山市埋蔵文化財調査報告, **64**, 87 pp.
- 宇佐美龍夫, 2017, 歴史地震の震度について, 歴史地震, **32**, 99-102.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子, 2013, 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 724 pp.
- 宇津徳治, 1982, 各種マグニチュードの間の関係, 地震研究所彙報, **57**, 465-497.
- 若松加寿江, 2018, そこで液状化が起きる理由, 東京大学出版会, 252 pp.
- 八木伸二郎・伊藤英文・上田さち子, 1984, 天正地震—特に濃尾・近江・越中の被害について, 大阪府立大学歴史研究, **23**, 1-53.
- 財団法人愛知県埋蔵文化財センター, 1994, 清洲城下町遺跡Ⅳ(本文編), 愛知県埋蔵文化財センター調査報告, **53**, 282 pp.
- 財団法人建設工学研究所, 1999, 阪神・淡路大震災と神戸の地盤—「神戸 JIBANKUN」の構築ならびに地盤と被害の分析一, 178 pp.
- 財団法人富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所, 2000, 開醇大滝遺跡・地崎遺跡発掘調査報告—能越自動車道建設に伴う埋蔵文化財発掘報告Ⅱ一, 富山県文化振興財団埋蔵文化財発掘調査報告, **11**, 395 pp.
- 財団法人富山県文化振興財団埋蔵文化財調査事務所, 2007, 岩坪岡田島遺跡 手洗野赤浦遺跡発掘調査 近世北陸道遺跡 発掘調査報告—能越自動車道建設に伴う埋蔵文化財発掘報告Ⅵ—(第1分冊), 富山県文化振興財団埋蔵文化財発掘調査報告, **35**, 408 pp.