

1909年姉川地震の地変と震源について

山村 紀香*

滋賀県立大学環境科学部† 小泉 尚嗣

琉球大学理学部‡ 中村 衛

Damage and Source Fault of the 1909 Anegawa Earthquake

Norika YAMAMURA

Naoji KOIZUMI

School of Environmental Science, The Univ. of Shiga Pref., 2500, Hassaka-cho, Hikone-City, Shiga, 522-8533 Japan

Mamoru NAKAMURA

Faculty of Science, Univ. of the Ryukyus, 1, Semburu, Nakagami Gun Nishihara Cho, Okinawa, 903-0213 Japan

The detail of the 1909 Anegawa earthquake is well understood because there are many survey reports that described the damage caused by this event at that time. However, the source fault is still unknown because the surface rupture did not appear. In this study, we investigated whether the damage of this event can be reasonably explained for hypothetical source fault along the Kajiya fault. The targeted damages are the liquefaction, the tsunami in Lake Biwa, and changes in groundwater. As a result, it was found that the liquefaction and changes in groundwater can be explained by predicted seismic intensity, coseismic static volumetric strain changes, and ground conditions. On the other hand, it was found that the tsunami in Lake Biwa cannot be explained and can be explained by the lake landslide.

Keywords: 1909 Anegawa Earthquake, Liquefaction, Tsunami, Landslide, Groundwater.

§ 1. はじめに

姉川(江濃)地震は、1909(明治四十二)年8月14日に発生した局地的な中規模の地震である(表1)。滋賀県から岐阜県にかけて被害をもたらした姉川流域の村落に全壊率60%を超えるような大被害を与えたほか、数多くの液状化現象(噴砂・噴水)や伊吹山の大規模な崩壊などが発生した。

この地震については、近江國姉川地震報告[滋賀県彦根測候所(1911)]や江濃地震報告[岐阜県岐阜測候所(1910)]、震災予防調査会報告[震災予防調査会(1910a, 1910b)]など、当時の地震被害を詳細に記した調査報告が多く残されており、被害状況がよくわかっている。

表1 姉川地震の概要(関西ライフライン研究会(1995)より作成)

Table 1. Abstract of the 1909 Anegawa Earthquake after Lifeline Network, Kansai (1995)

発生年月日	1909年8月14日15時31分
震央地名	滋賀県東部
震源位置	東経163.3°、北緯35.4° 深さ:ごく浅い
地震規模	マグニチュード6.8
断層	不明(浅井断層か鍛冶屋断層と思われる)
死傷者数	死者41名
家屋倒壊数	全壊978戸

* 兵庫県在住

電子メール: yamamura.norika.43m@kyoto-u.jp

† 〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町2500

電子メール: koizumi.n@ses.usp.ac.jp

‡ 〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地

電子メール: mnaka@sci.u-ryukyu.ac.jp

しかし、詳細な調査が実施されたにもかかわらず、断層破壊が地表面まで達していなかったため、震源断層については断定することができず、現在も不明である。当時の調査による結論では、鍛冶屋断層によるものと解釈されている[坂井・盛川(2005)]. ただし、鍛冶屋断層は、陸域の断層であるにも関わらず、震災予防調査会(1910b)には琵琶湖で津波が発生したと捉えることのできる記録もある。

本研究では、これらの調査報告などから得られる地変とその分布などの情報をもとに、詳細な地震像を明らかにし、被害を合理的に説明することを目標とする。ここでいう地変とは、液状化現象・琵琶湖の津波・地下水の変化をさす。

§ 2. 予測震度分布と液状化現象

姉川地震で被害が大きかった地域は、琵琶湖北東岸の姉川流域(現・長浜市周辺)であるが、その中でも被害の大きな地域と軽微な地域が複雑に入り組んでいる。坂井・盛川(2005)は、長浜市周辺で重力測定を行い、得られたブーグ異常から基盤構造モデルを作成した上で、上記のような被害分布を説明する強震動を出す断層モデル(図1, 表2)を作成した。

表2 断層モデル(坂井・盛川(2005)より作成)

Table 2. Parameters of the fault model after Sakai and Morikawa (2005).

断層位置	35.424N, 136.40E	
走向	300°	
傾斜	80°	
滑り角	20°	
M_j	6.8	
M_o (Nm)	4.74×10^{18}	
	Asperity	Back ground
長さ(km)	8.45	17.6
幅(km)	7.44	16.6
モーメント(Nm)	2.20×10^{18}	2.54×10^{18}
滑り量(m)	1.62	0.40

この断層モデルを参考にして、「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、予測震度分布図を作成した(図2)。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(2021)]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。

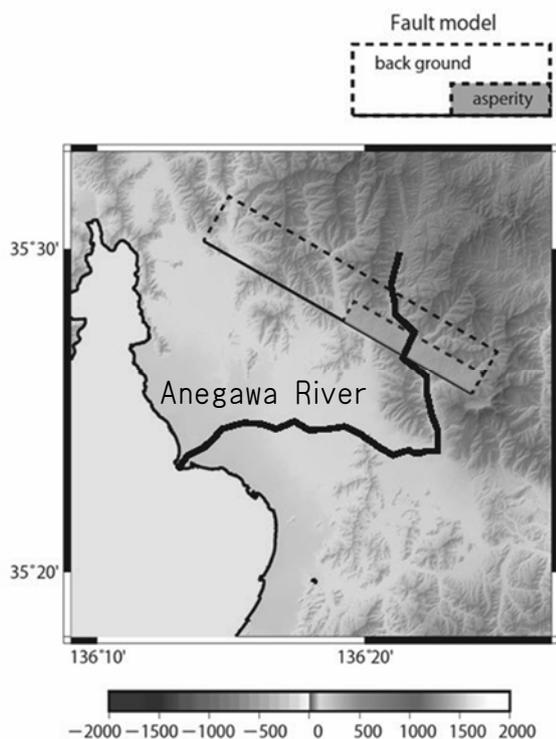


図1 断層モデルの図(坂井・盛川(2005)より作成)

Fig. 1. Map of the fault model after Sakai and Morikawa (2005).

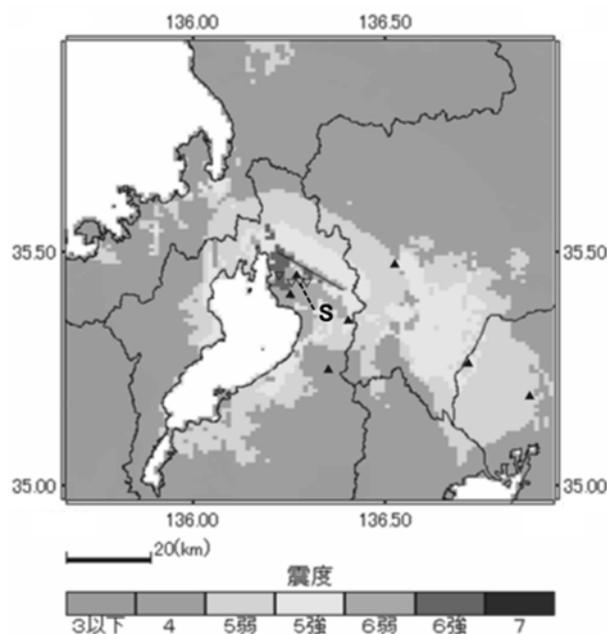


図2 鍛冶屋断層を震源とした場合(M_j 6.8)の予測震度分布図と地震後地下水変化(▲:増加, ▽:減少). Sは尊勝寺. 本図のカラー版は口絵●参照.

Fig. 2. Postseismic groundwater changes (▲:rise, ▽:drop) and predicted seismic intensity maps for hypothetical source fault along the Kajiya fault (M_j 6.8). S: Sonsoyoji. See Frontispiece ● for the color version.

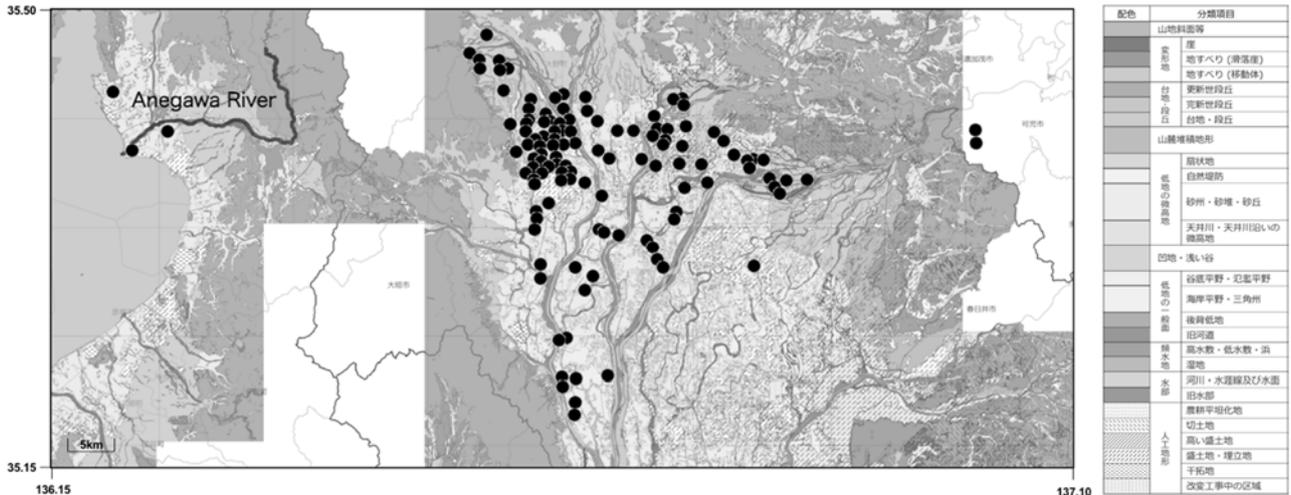


図 3 姉川地震による液状化現象が発生した地点(若松(2011)より作成). 地理院タイル 数値地図 25000(土地条件)を加工して作成. 本図のカラー版は口絵●参照.

Fig. 3. Liquefaction sites caused by the Anegawa earthquake after Wakamatsu(2011). The background of the map is GSI Tiles. See Frontispiece ● for the color version.

図 2 より, 長浜市周辺が震度 6 弱となることに加え, 岐阜市周辺が震度 5 強と予測されることがわかる.

一方, 姉川地震による液状化現象(噴砂・噴水)が発生した地点は, 若松(2011)によると, 120 箇所以上のぼる(図 3). 滋賀県内における大規模な噴砂は姉川河口周辺の 3 箇所のみで, 残りはほとんど岐阜県(大垣市や岐阜市など)に集中していることがわかる. これらの地点は, 谷底平野・氾濫平野や自然堤防, 三角州などの低地で, 地下水位が高く, 砂(粒径 0.075~2mm)を多く含む地層が多く分布している. このような地盤は, 液状化現象が発生しやすい条件が揃っている地盤であるとされる[若松(2018)].

そのため, これらの地盤に, 図 2 のような震度 5 強~6 弱の強い地震動の揺れが加われば, 液状化現象が発生してもおかしくない地点であるといえる.

§ 3. 津波による湖面の変化

震災予防調査会(1910b)によると, 姉川河口(図 1)において「下流湖岸ニ蒞メル泥州ノ中東西二百間南北二町餘ハ大震ノ震動中湖水下ニ陥没シク中略>土地陥没ニ引續キ高サ數尺ノ波浪押し寄せタリシカバ<中略>陥落ノ深サハ陸地ノ所ニテ四五尺ヨリ五六尺ニ及ビ」と記されており, 琵琶湖湖岸で陥没が生じた後に数尺(0.5-2m程度)の津波が押し寄せたことがわかる. なお, 姉川河口以外で津波が来たとの記載はなく, この津波は極めて局所的に生じたものである可能性が高い.

津波が引き起こされる原因としては, 断層運動と湖底地すべりが考えられる. 表 2 の断層モデルを用いて, 地震発生から 60 分間の最大水位を計算した. 計算格子間隔は 45m, 15m, および 5m であり, 姉川河口に近くなるにつれて格子間隔を狭くしている. 津波初期水位では, 地殻変動の鉛直変位に加えて水平変位も考慮している. その結果, 湖の北部で最大津波波高が 10cm 程度みられた程度で(図 4), 姉川河口周辺で顕著な水位の変化はなく, 震災予防調査会(1910b)の記述と一致しなかった.

次に湖底地すべりで考える. 上述の震災予防調査会(1910b)の記載によれば, 姉川河口の湖岸から湖底にかけての領域で「東西二百間南北二町餘」の地すべりが発生して, 地すべり上端部にあたる湖岸の泥洲が陥没し, 津波が発生したと推定することができる. 沈下した領域の正確な場所が分からないので, 地すべりが姉川河口(図 3)の左岸側(南側)か右岸側(西側)のどちらで起こったかは不明である. しかし, 沈下領域は東西方向に伸びた形状で表現されていることから, 陸に平行に伸びた領域が沈下したと仮定して, 地すべりモデルを南岸側に設定した. 地すべり領域の幅は, 沈下領域の幅(東西二百間)と同程度の 400m とし, 地すべり領域の長さは沈下領域の長さ(南北二町餘)と同程度の 200m としている. 沈下量は, 陸地で「四五尺ヨリ五六尺ニ及ビ」とあるので, 上端部が約 2m 沈下したと設定し, それに伴って全体で南に 30m 移動したと仮定した. 初期波高分布を Watts et

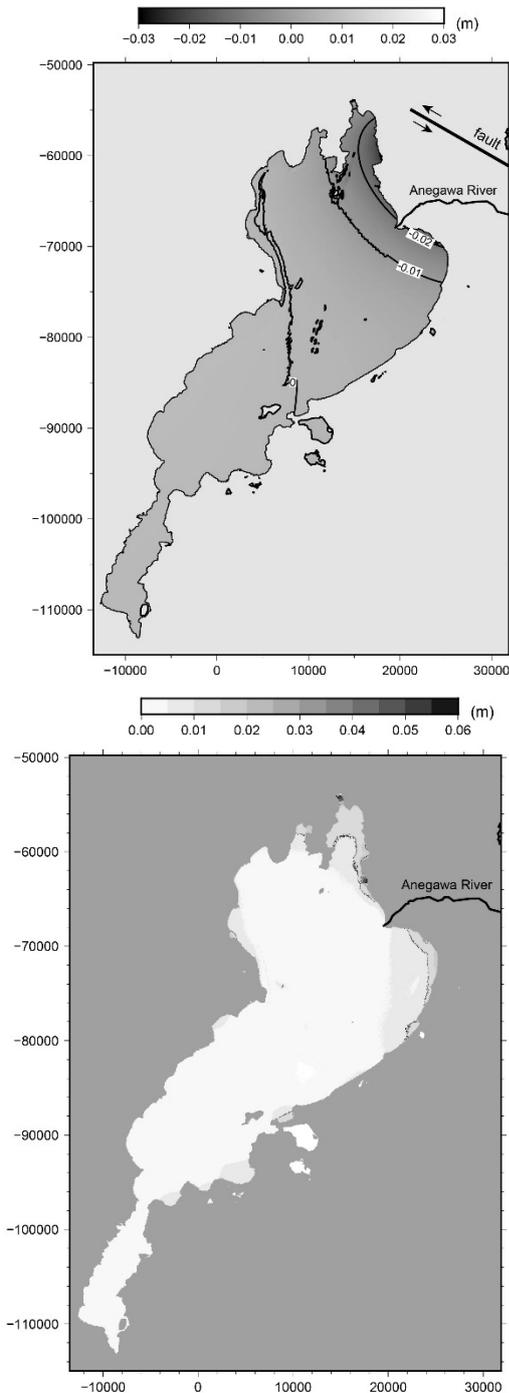


図 4 (上) 鍛冶屋断層が活動した場合の津波の初期波高と(下)最大波高分布

Fig. 4. (Top) initial and (bottom) maximum tsunami height by Kajiya fault.

al. (2005)を使用して計算した結果、姉川河口周辺で最大波高が約 0.5m と局所的に高くなった(図 5)。上記の沈下量については陸地での記載に基づくものであるから、実際にはもっと大きかった可能性もある。したがって、震災予防調査会(1910b)の記載に整合的な地すべりが姉川河口付近の琵琶湖底で生じた場

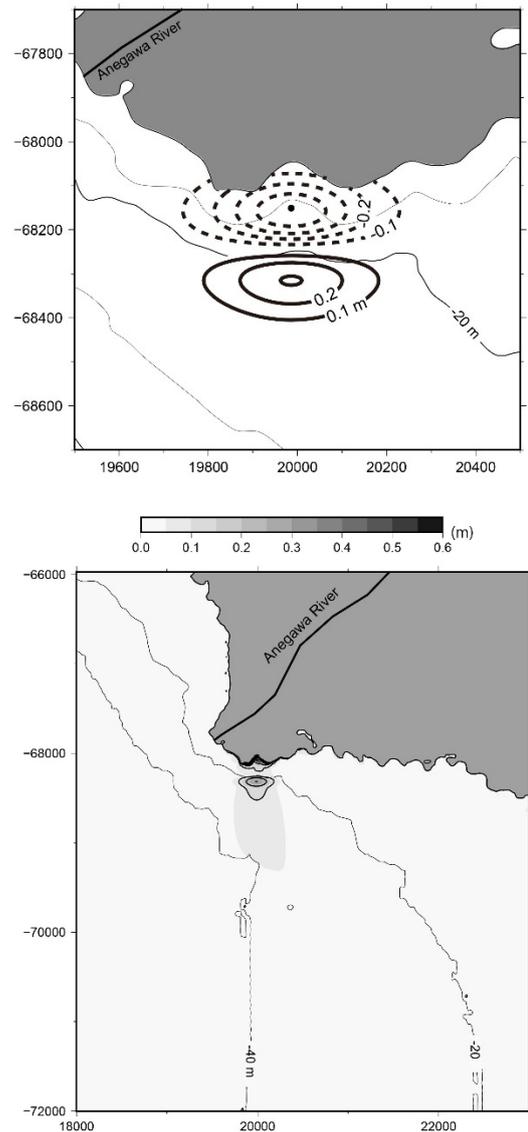


図 5 (上) 地すべりモデルによる津波の初期波高(太線:隆起, 破線:沈降, 単位は m)と(下)最大波高分布

Fig. 5. (Top) initial (thick lines: uplift, broken lines: subsidence) and (bottom) maximum tsunami height by landslide.

合、数尺の津波が引き起こされ得ることが判明した。津波の報告が姉川河口周辺に限られる事や姉川河口付近の陥没直後に津波が来たと記載されている事も考慮すると、1909 年姉川地震で記録されている琵琶湖の津波は、姉川河口付近の琵琶湖底の地すべりによって生じたと考えられる。

横ずれ断層型の地震であっても、沿岸部での地すべりによって津波が発生することがある。2010 年ハイチ地震(Mw7.0)では、三角州で生じた液状化によ

て、海岸に沿った長さ 400 m, 幅 100 m の領域が崩落し、津波を発生させた(Hornbach et al., 2010). 2018 年インドネシア・パル地震(Mw7.5)では、液状化によって湾の沿岸部と海底で地すべりが生じ、津波を発生させた(Sassa and Takagawa, 2019). 琵琶湖でも、大地震の時に湖岸付近の地すべりによって、局所的な津波が発生しうること示している。

なお、以上の津波計算においては、津波計算コード JAGARS(Baba et al., 2015)を使用した。地形データには、熊谷(私信)による琵琶湖湖底の地形データと、基盤地図情報数値標高モデルを用いている。

§ 4. 地下水の変化と断層モデル

震災予防調査会(1910b)で報告されている地震後の地下水変化(井戸水や湧水等の変化)の分布について、図 2 に予測震度分布と共に、図 6 に地震時の静的体積歪変化と共に示した。井戸水や湧水等の増減は、地下水圧の増減を示していると考えられる[小泉(2013)].

地下水変化は予測震度 4 以上のところで発生している。計器で連続観測されている事が前提だが、震度 3 以上になるとかなりの確率で地震時～地震後の地下水変化が検出されていることを考えると[例えば、Itaba and Koizumi(2007), Itaba et al.(2008)], 予測震度分布と地下水変化は整合している。また、震源域から離れて予測震度 5 弱以下の場所ではいずれも地下水変化は増加を示すのに対し、震源域近傍の予測震度 6 弱以上の場所では地下水の増加と減少が混在している(図 2)。

体積歪変化による地下水圧変化は、地震時静的体積歪変化が増加(伸び)の所で減少し、減少(縮み)の所で増加する。また、一般的に地下水圧の体積歪変化に対する感度が最大でも数 $\text{cm}/10^{-8}$ 程度であることを考慮すると[例えば、Roeloffs(1996), Itaba et al.(2008)], 地震時静的体積歪変化が 10^{-8} 程度かそれ以下の場所で、静的体積歪変化に対応した地下水変化が目視で検出できるとは考えにくい。以上から、震源域西側(滋賀県側)の 10^{-6} 以上の伸びの領域での地下水増加(2 点)や震源域東側(岐阜県側)の 10^{-6} 以上の伸びの領域での地下水増加(1 点)、及び、 10^{-8} 程度かそれ以下の縮みの領域(愛知県側)の地下水増加(2 点)については、地震時静的体積歪変化によるものではなく、上述の液状化現象等によるものと考えられる。他方、 10^{-6} 以上の縮みの領域である震源域南東側での地下水増加(2 点)や $10^{-6} \sim 10^{-5}$ の

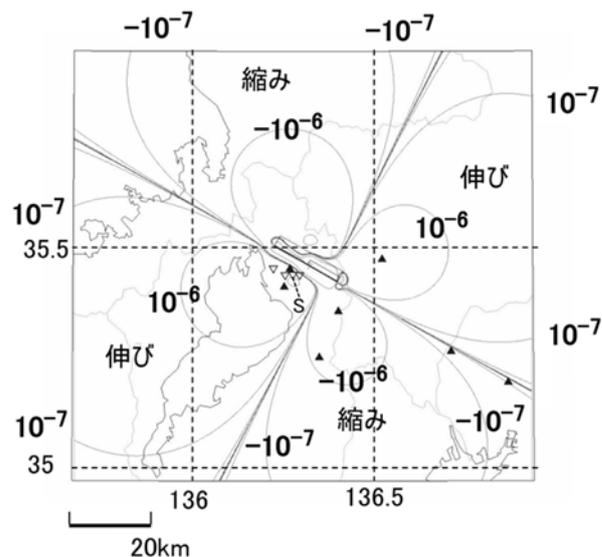


図 6 地震後の地下水変化と表 2 の断層モデルから MICAP-G[内藤・吉川(1999)]を用いて計算した地震時の静的な体積歪変化. S: 尊勝寺.

Fig. 6 Postseismic groundwater change and coseismic static volumetric strain change calculated by the program of MICAP-G [Naito and Yoshikawa(1999)]. The parameters of the fault model are after Table 2. S: Sonsyoji.

伸びである領域(震源域南側)での地下水低下(4 点)は、地震時静的体積歪変化によって生じている可能性がある。特に、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ の伸びである領域(震源域南側)は、滋賀県の虎姫村(当時)～長浜(当時)に対応していて、掘り抜き井戸が多く用いられていた場所でもある[震災予防調査会(1910b)]. たとえば、減少地点の S(尊勝寺)において、図 2 や図 6 では ∇ を 1 つ示しているだけだが、集落の 70 の井戸の内、68 の井戸で水が枯渇したと記載されている[震災予防調査会(1910b)]. 掘り抜き井戸は、一般に被圧地下水(粘土層等に挟まれていて体積歪変化に対して感度が良い地下水)を汲む井戸であり、これらの多数の井戸水の水位低下については、地震時の体積歪増加による地下水圧低下が主因と考えられる。上述の被圧地下水の体積歪変化に対する感度(数 $\text{cm}/10^{-8}$ 程度)を考慮すれば、地震時の静的体積歪変化が 10^{-5} オーダーになりえる尊勝寺(S)では、理論上、最大数十 m の水位相当の地下水圧低下が想定されるからである。

以上の結果から考えると、表 2 に示した坂井・盛川(2005)の断層モデルによる予測震度分布や地震時静的体積歪変化は、報告されている地下水変化と調

和的である。

§ 5. おわりに

1909年姉川地震で報告されている液状化現象・琵琶湖の津波・地下水の変化[震災予防調査会(1910b), 若松(2011)]について, 坂井・盛川(2005)の断層モデルによって合理的に説明できるかどうかを調べた。液状化現象と地下水変化については, 坂井・盛川(2005)の断層モデルから推定される予測震度分布や地震時静的体積歪変化及び地盤状況で説明できることがわかった。他方, 琵琶湖の津波については, 坂井・盛川(2005)の断層モデルでは説明できず, 震災予防調査会(1910b)の記録に整合するような湖底地すべりによって, 説明できることがわかった。

謝辞

熊谷道夫立命館大学教授(元・滋賀県琵琶湖研究所上席総括研究員)には, 琵琶湖湖底地形の貴重なデータを頂いた。記して感謝します。

対象地震: 1909年姉川地震

文 献

- Baba, T., N. Takahashi, Y. Kaneda, K. Ando, D. Matsuoka, and T. Kato, 2015, Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami. *Pure Appl. Geophys.*, **172**, 3455-3472. doi:10.1007/s00024-015-1049-2
- 防災科学技術研究所, 2021, J-SHIS からダウンロードできるデータ, <<https://www.jshis.bosai.go.jp/download>>, (参照 2021-01-20).
- 岐阜県岐阜測候所, 1910, 江濃地震報告, 186 pp.
- Hornbach, M.J., N. Braudy, R.W. Briggs, M.H. Cormier, M.B. Davis, J.B. Diebold, N. Dieudonne, R. Douilly, C. Frohlich, S.P.S. Gulick, H.E. Johnson III, P. Mann, C. McHugh, K. Ryan-Mishkin, C. S. Prentice, L. Seeber, C.C. Sorlien, M.S. Steckler, S.J. Symithe, F.W. Taylor and J. Templeton, 2010, High tsunami frequency as a result of combined strike-slip faulting and coastal landslides. *Nature Geosci.*, **3**, 787-788. doi:10.1038/ngeo975.
- Itaba, S. and N. Koizumi, 2007, Earthquake-related changes in groundwater levels at the Dogo hot spring, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 2397-2410.
- Itaba, S., N. Koizumi, T. Toyoshima, M. Kaneko, K. Sekiya, and K. Ozawa, 2008, Groundwater changes associated with the 2004 Niigata-Chuetsu and 2007 Chuetsu-oki earthquakes, *Earth Planets Space*, **60**, 1161-1168.
- 関西ライフライン研究会, 1995, 明治以降関西地域の地震と被害, 47-65.
- 小泉尚嗣, 2013, 地震時および地震後の地下水圧変化, *地学雑誌*, **122**, 159-169, doi:10.5026/jgeography.2012ap03.
- 熊谷道夫, 2021, 琵琶湖底標高データ, 私信。
- 内藤宏人・吉川澄夫, 1999, 地殻変動解析支援プログラムの開発, *地震*, **52**, 101-103.
- Roeloffs, E., 1996, Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, in *Advances in Geophysics*, edited by R. Dmowska, 135-195, Academic Press, San Diego.
- 坂井公俊・盛川仁, 2005, 姉川地震による被害地域における重力探査を用いた三次元基盤形状のモデル化, *物理探査*, **58**, **4**, 331-338.
- 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.
- Sassa, S. and T. Takagawa, 2019, Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, **16**, 195-200. doi:10.1007/s10346-018-1114-x.
- 滋賀県彦根測候所, 1911, 近江國姉川地震報告, 94 pp.
- 震災予防調査会, 1910a, 震災予防調査会報告, **69**, 31 pp.
- 震災予防調査会, 1910b, 震災予防調査会報告, **70**, 63 pp.
- 若松加寿江, 2011, 日本の液状化履歴マップ 745-2008, 東京大学出版会, 90 pp.
- 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.
- Watts et al., 2005, *J. Water. Port, Coast, Ocean Engineer.*, 298-310.