

琵琶湖西岸断層帯南部の仮想地震による地殻変動と琵琶湖疏水

Seismic hazard of the Biwako-seigan fault zone and
cut-off risk of the Lake Biwa Canal

川崎一朗¹・岡田篤正¹・遠田晋次²・小松原琢³

Ichiro Kawasaki, Atsumasa Okada, Shinji Toda and Taku Komatsubara

¹立命館大学特別招聘教授 歴史都市防災研究センター (〒603-8341 京都市北区小松原北町58)

Professor, Ritsumeikan University, Disaster Mitigation of Urban Cultural Heritage

²京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Associate Professor, Kyoto University, Disaster Prevention Research Institute

³産業技術総合研究所 地質情報研究部門 主任研究員 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1 中央第7)

Senior researcher, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

This is a preliminary report on potential risks which would be caused by thrust-type inland earthquakes. If earthquake occurs at the Biwako seigan active fault system, the eastern half of the base of the Lake Biwa Canal could become higher than surface level of the Lake Biwa by uplift at hanging wall side in lower reaches and subsidence at footwall side in the upper reaches.

Keywords: Lake Biwa Canal, Biwako-seigan fault zone, 1185 Genryaku earthquake, crustal deformation

1. はじめに

2011年東日本大震災では、牡鹿半島から石巻の沿岸部が広域的に1m以上もの沈降が生じ、沿岸の住宅地は満ち潮の度に定常的に海水面下となり、住民が長期にわたって苦しめられ続けている。地震防災では地震動による災害のみに注目が集まりがちであるが、牡鹿半島一帯の現状は、地殻変動が大きな災害要因になることを如実に示した。本報告は、近畿地方中央部における地殻変動災害のありうる事例として、琵琶湖西岸断層帯と琵琶湖疏水の場合を検討する。

2. 琵琶湖西岸断層帯南部の地震による想定地殻変動

琵琶湖西岸断層帯は、第1図のように、北は滋賀県高島市マキノ町の福井県境近くから南は大津市国分付近に至る、走向北北東-南南西、長さ約60kmの西上がりの逆断層である。過去の活動時期の違いから、安曇川近くで約23kmの断層帯北部と約38kmの南部に分けられている。

地震調査委員会(2009)¹⁾の活断層評価では、琵琶湖西岸断層帯南部にたいして、長さ38km、幅は不明、上端の深さ0km、走向N20E、傾斜は地表から深さ3kmまで40°、深さ3-5kmで35°、5km以深は不明、1回のずれの量6-8m(上下成分)、M7.4と想定している。以下の計算では、活断層評価では曖昧なパラメーターや与えられていないパラメーターは、幅30km、断層面にそった滑り量(断層面で向かい合う岩盤が食い違う大きさ)11m、走向N25E、傾斜40°と仮定した。傾斜40°の断層面に沿って上盤と下盤が11m滑ると、方向余弦の上下成分は、地震調査委員会の想定6-8m(上下成分)の平均7mになる。

第2図は、これらのパラメーターを入力とし、Okada(1992)²⁾のプログラムを使って1kmグリッドで計

算し、プロットした静的変位のパターンである。断層線西側上盤で最大 5.98m、京都市内で 1 m 程度の隆起となり、断層線東側下盤で最大 69cm、琵琶湖大橋以南は 50cm ほどの沈降となる。なお、静的変位とは、地震動が通り過ぎて行った後に残る以前の位置からのずれである。静的変化は、地震計では測れず、測量や GPS などの測地学的手法によって計測されるので、地殻変動と言いつわされている。

不確定要素は多い。その一つは断層面の傾きである。活断層評価では 5km 以深は不明とされているが、微小地震もほとんど発生しておらず、微小地震の分布から断層面を決めることはできない。ここでは、仮に、断層面を 70° と高角に変えて（滑り量を 8m）計算したのが第 3 図である。断層面の傾斜が 40° の場合（第 2 図）は、大きな地殻変動が起こるのは断層面上の盤側に偏るが、高角（第 3 図）になると、上盤側の地殻変動は縮小し、最大隆起は 4.35m となる。逆に、下盤側の沈降域は拡大し、断層直近で 2.22m、近江八幡で 50cm から 100cm になる。

もう一つの不確定要素は滑り量である。M7 クラスの内陸型地震の場合、1943 年鳥取地震では 2m から 3m、1948 年福井地震では 2m から 3m、1995 年兵庫県南部地震では 2m から 3m、2007 年能登半島地震は 2m から 3m などの例のように大きくても 5m を越えない。従って、断層面に沿っての通常の意味での滑り量 8m（傾斜角 40° の場合）から 11m（同 40°）は、M7 クラスの内陸型地震としては大きすぎるように思われる。ただし、滑り量の想定を 1/3 の 2.5m から 3.5m 程度としても、第 2 図と第 3 図のコンターの値を 1/3 にするだけで、空間分布のパターンは変わらない。三つ目の不確定要素は、計算の都合上、断層面は 1 枚の長方形の平面で、滑り量は断層面全体で同じ値としたことである。実際の地震の場合は、滑り面は断層面上の場所によって大きく変わる。第 2 図と第 3 図をみる場合は、これらの不確定要素が存在することに注意する必要がある。

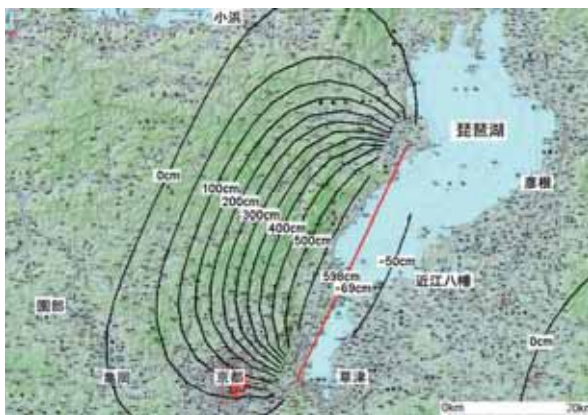
この様な不確定要素の存在にも関わらず、次のことは指摘できる。

（問題点 1）琵琶湖西岸断層帯南部は、大津で琵琶湖疏水を横切っており、もし地震が起これば、たとえ地震動による破壊を免れても、流路は断絶する。ここではそれを琵琶湖疏水断水問題と呼ぶことにする。

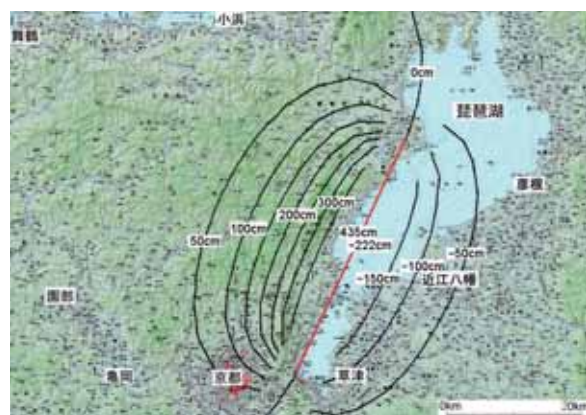
（問題点 2）琵琶湖南部が地震に同期して沈降するので、北部の湖水が南流し、琵琶湖南部の湖岸は津波に



第 1 図 琵琶湖西岸断層帯の位置。地震調査委員会（2009）¹⁾による。



第 2 図 長さ 38km、幅 30km、上端の深さ 0km、走向 N25E、傾斜西へ 40° の逆断層、ずれの量 11m と仮定して静的変位の上下成分。基図は、国土地理院の国土基本図。デジタル図化はカシミール 3D を用いた。



第 3 図 第 2 図の場合で、断層面の傾きを 70° に滑り量を 8m に変えた場合の静的変位の上下成分。他はすべて第 2 図と同じ。

襲われる。堅田断層以北が動くような地震だと瀬田川洗堰（旧南郷洗堰）は沈降域外になり、津波は琵琶湖の中に留まる。逆に、堅田断層より南の比叡断層や膳所断層が動く地震だと瀬田川洗堰も同時に沈降し、津波は瀬田川洗堰をこえて瀬田川から宇治川へ流れ下る。

本論では、(問題点1)のみを対象とし、(問題点2)はべつの機会に譲りたい。

3. 琵琶湖疏水

第4図は琵琶湖疏水の流路図である。疎水には2流路あり、第1疎水は、1890年（明治23年）、水道用水や発電を目的に作られた。それは、大津市の大津開門からはじまり、全長ほぼ8km（直線距離で6kmほど）の距離を5mの落差（傾きほぼ2000分の1）で流れたあと、蹴上でインクラインのそばを傾き15分の1で京都盆地に流れ下る。第2疎水は、1912年（大正3年）に完成、琵琶湖沿岸部の取水口で直ちに地下トンネルとなり、第1疎水と同様に蹴上から京都盆地に流れ下る。第2疎水には、1996年、琵琶湖の水面低下に対応するため、取り入れ口からただちに20mを越える縦穴に入り、山科盆地で元の第2疎水に戻る連絡トンネルが造られた。これらは、京都の発展に大きな役割を果たしてきた。現在では、第2疎水が、140万京都市民の飲み水のほとんど提供しており、京都の命綱となっている。

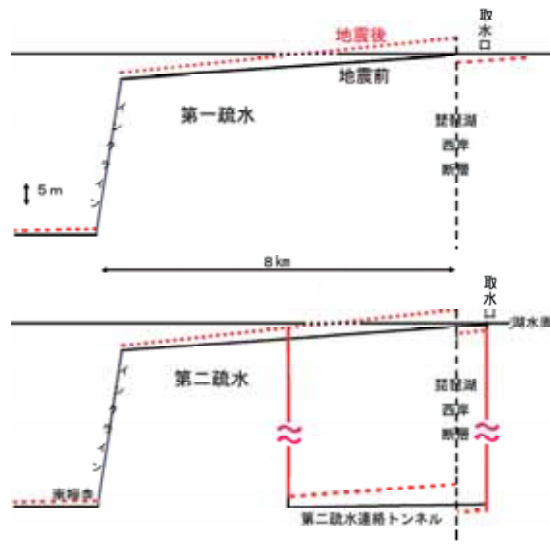
問題は、琵琶湖西岸断層帯南部が比叡山東麓の山地と平野部を区切って走っており、琵琶湖疏水を横切っていることである。第2図の場合にしる、第3図の場合にしる、第5図黒実線の直径約4mの流路は、地震後には同図赤破線のようになり、断層部で上下にほぼ7mずれて断絶する。東寄り数kmの疎水底面は琵琶湖の平均水面より高くなる。滑りの大きさを1/3にすると断層の上下ずれも1/3（図の地震前と地震後の差が1/3）になり、疎水の底面が琵琶湖の平均水面より高くなる距離は短くなる。いずれにせよ、仮に地震動による破壊を免れても、数kmに渡って疎水底面が琵琶湖の平均水面より高くなり、京都盆地に飲料水や消防用水を供給することは不可能になる。復旧工事は長期に及び、京都市民は何ヶ月も、あるいは何年も水の極端に乏しい生活を強いられるかも知れない。

4. 1185年元暦地震

院政の末期から源平の合戦に至る時期は災厄の時期であった。1177年（安元三年）、大火によって内裏を含む八省院は焼失した。1179年（治承三年）には平清盛のクーデターによって院政が停止され、次の年には以仁王の宣旨によって反乱が全国に拡大した。平安京には年貢が集まらなくなり、養和の飢饉（1181年から1182年）に陥った。なお、1181年（治承五年）に平氏政権によって養和と改元されたが、平氏滅亡後は治承が継続したものとして扱われてる。飢饉の中で源平の争いが続いたが、1184年に入って局面は急展開し、木曾義仲が後白河法王を攻めた法住寺合戦（1月3日）、義仲が滅ぼされた近江粟津合戦（3月5日）、摂津一ノ谷合戦（3月20日）と、わずか3ヶ月の間に平安京は繰り返し戦場となった。次の年、屋島の戦い（1185年3月22日）と壇ノ浦の戦い（4月25日）で平家は滅んだ。その3ヶ月後（7月9日）に元暦地震が起こ



第4図 琵琶湖疏水の流路図。京都市上下水道局のHPの図を修正。



第5図 琵琶湖疏水の流路の垂直図。水平方向に比べて上下方向はほぼ1万倍に拡大されている。黒実線は地震前の流路、赤破線は地震後の流路。

った。

高橋 (2012)³⁾ は、山槐記 (中山忠親の日記) の記述から、元暦地震の時、白河 (現在の岡崎周辺) 法勝寺の高さほぼ 80m の九重塔が、心柱こそ倒壊は免れたが、塔頂の相輪は折れ落ち、各層の屋根は悉く落ち、初重から八重までは無きがごとく無惨な状態になったとした。他の寺院の被災も合わせ考えれば、白河における地震動が激烈であったに違いない。さらに、東西方向に長い建物より、法勝寺阿弥陀堂や得長寿院千体堂など南北に長い建造物の被害の方が多かったので、地震動は東西方向が卓越していたと推測した。

問題の 1 つは、震源断層が花折断層帯南部であったのか、琵琶湖西岸断層帯南部であったのかである。

東郷・他 (1997)⁴⁾ は、花折断層帯北端の途中谷 (滋賀県高島市) トレンチ発掘調査から、1185 年の地震のときに花折断層帯が動いた可能性を示唆した。しかし、京都市内の吉田山西麓の今出川通りトレンチ発掘調査では 1185 年に動いた痕跡は見いだされなかった (吉岡・他, 1998)⁵⁾。大津市本堅田の堅田断層のジオスライサーとボーリングからは、琵琶湖西岸断層帯で 12 世紀後半に地震が起きた可能性が示された

(Kaneda et al, 2008)⁶⁾。活断層学的には、震源断層は琵琶湖西岸断層帯南部と考えて間違いなさそうである。

西山 (2001)⁷⁾ は、白河の被害が甚大であったこと、左京 (当時は鴨川西側) の被害が大きかったこと、比叡山でも被害があったこと、「華頂要略」(京都青蓮院の寺誌) によると大津から坂本でも被害があったこと、一方、大原三千院などの被災の記録が残されていないこと、仁和寺や法金剛院のある衣笠や善峯寺の被害が小さかったことなどから、被害分布 (第 6 図参照) の視点からも琵琶湖西岸断層帯南部説が妥当と結論した。

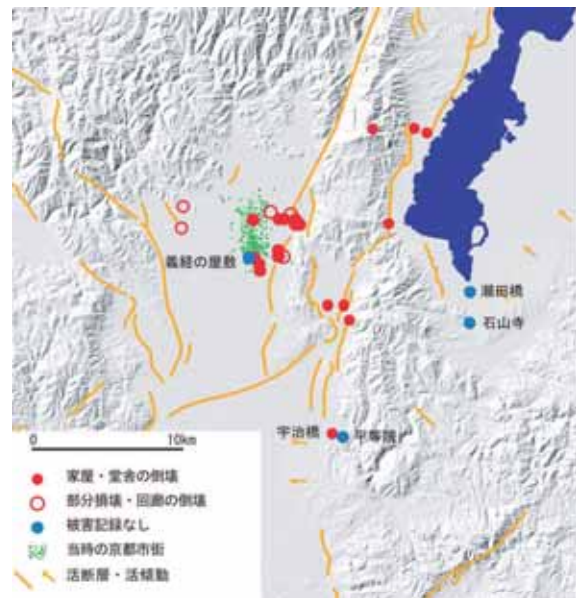
しかし、比叡山の被害については、高橋 (2005)⁹⁾ は「意外と小さい」という印象を述べているし、そもそも、延暦寺は、花折断層帯からも琵琶湖西岸断層帯からも距離はあまり変わらず、花折断層帯か琵琶湖西岸断層帯かを左右する材料にはならないのではないだろうか。また、仁和寺や法金剛院のある衣笠や善峯寺の被害が少ないのは地盤がよいからとも考えられる。大津から坂本の被害についても、江戸時代の文献である「華頂要略」は考えないことにすると、元暦の地震のときの大津から坂本の被害は不明としておいたほうがよい。

ここで着目したいのは、京都市第 3 次被害想定

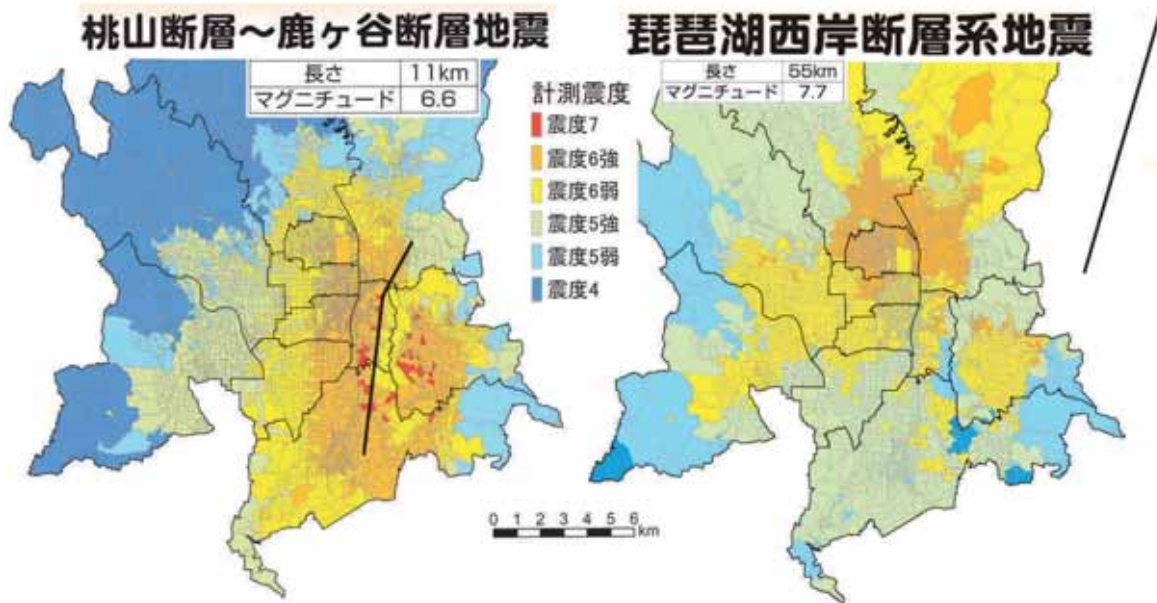
(2003)¹⁰⁾ の震度予測 (第 7 図) と元暦地震の被害分布 (第 6 図) の対応と、白河 (現在の岡崎) と近隣の活断層との位置関係である。現在と 800 年前の状況は大きく異なるので、京都市被害想定をそのまま適応することはできないにしても、大局的には参考になるであろう。京都市被害想定では、桃山・鹿ヶ谷断層を想定断層とした場合、震度 7 となるのは東山西縁部の知恩院から伏見稲荷までと山科盆地中央部で、白河は震度 6 である。当時東山西縁部に存在した大型建造物は六波羅第と法住寺 (現在の国立博物館と三十三間堂付近) であるが、地震の前に、六波羅第は平家都落ちの後焼失し、法住寺は法住寺合戦で焼失したので参考にならない。山科の被害は震度予測と調和的である。

都市圏活断層図「京都東北部」(岡田・他, 1996)¹¹⁾ によれば、岡崎は、花折断層帯南端 (吉田山西麓) と桃山断層北端 (知恩院西端) の間に位置している。両者が地下深部で繋がって潜在断層になっているとすると、白河は潜在断層直上であり、法勝寺の九重塔は上盤に位置することになり、甚大な被害も不思議ではない。琵琶湖西岸断層帯が震源であったとすると、白河は第 7 図右のように震度 6 弱にしかならず、激甚な被害は説明困難であろう。

マグニチュードが M7.4 と大きな見積もりになっている主たる原因は「新収日本地震史料」(東京大学地震研究所によって集められた歴史地震史料) で三河で有感とされていることであるが、高橋 (2005)⁸⁾ は、



第 6 図 1185 年元暦地震の被害分布。小松原 (2011)⁸⁾ による。



第7図 京都市第3次被害想定（2003）¹⁰⁾における想定震度。

「新収日本地震史料」の元になった愛知県渥美郡の「常光寺年代記」の常光寺が15世紀の開創なので同時代史料では無く、証拠にならないとしている。有感範囲が京都盆地と周辺ならば、震源断層が桃山断層という10km規模の活断層でも差し支えはないと言えよう。高橋（2005）⁸⁾は、「院政期には、近臣受領層の奉仕により、さまざまな土木建築事業が、粗製濫造といっておかしくないような速度と数で、次々と遂行されていった。この結果、完成してあまり時がたたないうちに、早くも痛みが表れてくる」ことが被害を大きくした可能性も指摘している。

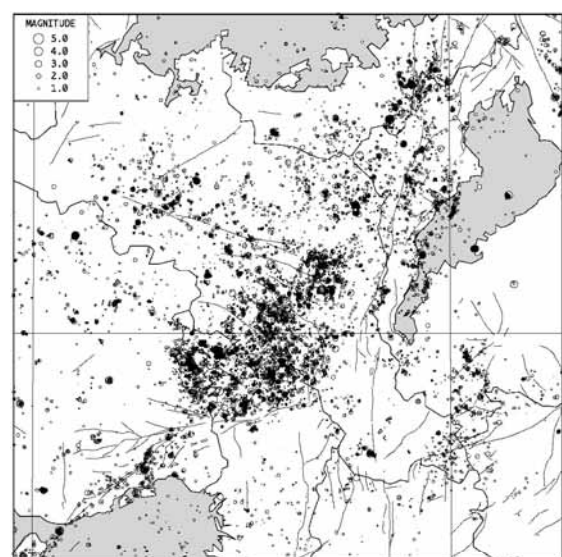
以上の議論を考慮すれば、筆者としては、桃山断層（潜在断層として白河の部分も含む）を選択肢の一つとして残しておき、「既存の資料の範囲内ではどちらとも決められない」としておいた方が賢明と思える。あるいは、後述の議論も含め、「花折断層帯南部か、琵琶湖西岸断層帯南部か」という問題設定ではなく、「桃山断層（花折断層帯南部の支断層の一つ）か、堅田断層か」という問題設定にした方が良いとも言えそうである。悩ましいのは、活断層学的な証拠（堅田断層の撓曲の6-8mの上下差）と、白河における甚大な被害が両立しそうな無いことである。

5. 琵琶湖西岸断層帯南部

琵琶湖疏水断水問題の切迫性は、琵琶湖西岸断層帯南部で地震がおこる切迫性にかかっていると言えよう。

第8図は、近畿地方中央部の微小地震分布である。花折断層帯も琵琶湖西岸断層帯も、丹波山地異常地殻活動域の東端に位置している。しかし、両断層帯沿いの地震活動は少なく、微小地震分布から断層の傾きなどを推定することは不可能である（片尾、2005）¹³⁾。

2006年10月、京都大学防災研究所と東京大学地震研究所とによって、丹波山地から琵琶湖を横断して濃尾平野にいたる約100kmの測線（第9図）で反射法地震探査が行われた（佐藤・他、2008）¹⁴⁾。第10図はその結果と解釈である。図中央の太曲線（深さ0mから1000m）より深いところがP波速度5km/sをやや越える花崗岩質



第8図 2007年～2011年の5年間の近畿地方中央部の微小地震地震分布。片尾（私信）による。

層の基盤である。基盤は、堅田断層で東側がほぼ 300m 落ち込んでいる。そこから鈴鹿山脈西縁に至る東西幅ほぼ 10km の浅部を P 波速度 2.1km/s から 2.3km/s の堆積層が埋めている。

堅田断層から西に向かって 20° 程度の低角で西に向かって傾斜する断層面を推定できるが必ずしも明瞭ではない。琵琶湖最深部から低角で東に向かって延びる断層面も存在するが、その素性は不明である。

地震調査委員会 (2009) ¹⁾ の活断層長期評価では、琵琶湖西岸断層帯南部での地震発生間隔は 4500 年から 6000 年、前回の地震は 1185 年 M7.4 元暦地震、したがって次の地震の 30 年発生確率はもちろん、300 年発生確率までもほぼ 0% である。

元暦地震の震源断層を琵琶湖西岸断層帯南部とした根拠は、堅田断層のジオスライサー調査によって、12 世紀前後に生じた撓曲を挟んで

6-8m の変位差があったことである (Kaneda et al., 2008) ⁶⁾。滋賀県文化財保護協会・財団法人滋賀県埋蔵文化財保護協会 (2008) ¹⁵⁾ の調査では、浮御堂遺跡の深さ 2m ほどのところに平安時代の地層が見いだされ、平安時代後期から鎌倉時代に急激に沈降したことが明らかにされた。この知見は、元暦地震のとき堅田断層が動いたことと調和的である。他の状況証拠も合わせ考えると、元暦地震のとき、堅田断層が動いたことは比較的確実であろう。

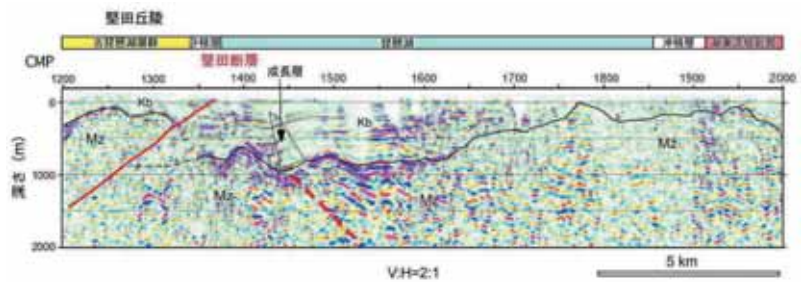
しかし、琵琶湖西岸断層帯南部は、北から、比良断層、堅田断層、比叡断層、膳所断層から成り立つが、比叡断層や膳所断層の発掘調査は行われていない。膳所断層 (第 11 図) は大局的には断層地形が明瞭であるにも関わらず、変位地形は不連続で、低位段丘を変位させていない可能性が高く、最近の地震活動は無い。1184 年 (寿永三年、元暦元年)には、源範頼らが数万騎を率いて瀬田より参洛、栗津の合戦で木曾義仲を敗死させており、瀬田橋が 1184 年段階で存在していたことは間違いない。一方、元暦地震の時の宇治橋の被災を「山槐記」「醍醐寺雑事記」が記載しているが、瀬田橋の被災記録は存在しない (小松原、2011) ¹⁴⁾ ので、瀬田橋は落ちなかったと考えるのではない。この点からも、膳所断層は動かなかったと思われる。

6. まとめ

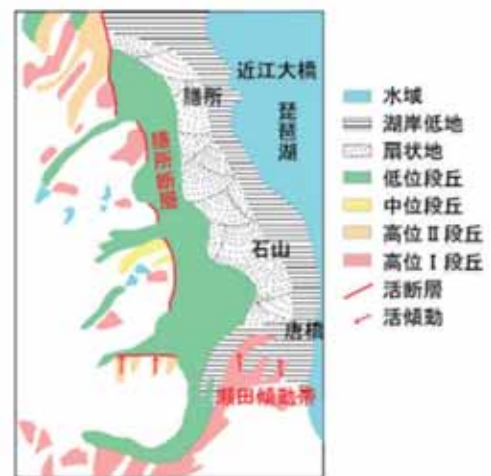
第 7 図に京都市の例を示したが、京都府も、大津市も、滋賀県も、琵琶湖西岸断層帯を地震断層とした場合の地震動による震度想定と被害予測を行っている。しかし、よく考えると、そのとき、震源では断層が大きくずれているのである。当然のことながら、琵琶湖疏水でも断絶が起こっている。もちろん、次の地震の



第 9 図 2006 年反射法探査の側線。佐藤・他 (2008) ¹²⁾ の図に加筆。



第 10 図 2006 年反射法探査によって得られた地殻浅分の構造断面図。佐



第 11 図 膳所断層の位置図。小松原・他 (2011) ⁸⁾ による。

時、この部分が動かない可能性もあるが、この部分が確実度の高い活断層である以上、いつかは確実に琵琶湖疏水を断絶する動きをすることは間違いない。しかも深刻なのは、トンネルの底面が km に及ぶ長い距離で琵琶湖の平均水面より高くなるので、短期間に修復できる性質のものではないことである。既存の被害想定でこの様な問題が見逃されていたのは、盲点だったと言えよう。

日本国中どこにも活断層があるので、どこにでもこの様なリスクがあるのかと言えば意外とそうではない。地殻変動が、琵琶湖疏水断絶のようなやっかいな災害を引き起こすリスクが存在するのは、「縦ずれ断層で下流が上盤」という例外的な位置関係にあることと、「流路がトンネル」という 2 点が問題を起こしているからである。

もちろん、現在の地震学や活断層学の知識の範囲内では、ここで想定した通りの地震が起こるかどうかは分からない。断層上の滑りの場所変化も大きいし、震源断層が地表に突き出るかどうかとも予測できない。しかし、上述のようなリスクが潜在していることだけは認識しておきたい

このリスクは、京都の歴史都市防災にとって極めて深刻な問題であるのも関わらず、現在の時点では、余りにも多くのことが曖昧である。琵琶湖西岸断層帯南部や花折断層帯南部における地震発生リスクを明らかにし、琵琶湖疏水断絶、津波、洪水のリスクを評価し、対策が提案できるようになるために、今後の比叡断層や膳所断層での断層発掘調査、河川学との共同研究などが極めて重要である。

参考文献

- 1) 地震調査委員会：三方・花折断層帯の長期評価について。地震調査研究推進本部地震調査委員会 HP、2003.
- 2) Okada, Y. : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bulletin of Seismological Society of America, 82, 1018-1040, 1992.
- 3) 高橋昌明：養和の飢饉、元暦の地震と鴨長明、文学、13 卷、2 号、48-60、2012.
- 4) 東郷正美・佐藤比呂志・嶋本利彦・堤昭人・馬勝利・中村俊夫：花折断層の最新活動について。活断層研究, 16, 44 - 52, 1997.
- 5) 吉岡敏和・苅谷愛彦・七山 太・岡田篤正・竹村恵二(1998)：トレンチ発掘調査に基づく花折断層の最新活動と 1662 年寛文地震。地震Ⅱ、51、83-97.
- 6) Kaneda, H., H. Kinoshita and T. Komatsubara: An 18,000-year record of recurrent folding inferred from sediment slices and cores across a blind segment of Biwako-seigan fault zone, central Japan. Jour. Geophys. Res., 113, B05401, 2008.
- 7) 西山昭仁：元暦二年(1185)京都地震における京都周辺地域の被害実態、歴史地震, No.16, pp163-184, 2000.
- 8) 小松原琢：近江盆地南部の活構造と元暦二年地震の起震断層に関する考察、第 28 回歴史地震研究会発表講演要旨集、16、2011.
- 9) 高橋昌明：日本史学者の見た元暦二年七月京都地震について、月刊地球、27、11、2005.
- 10) 京都市：京都市第 3 次被害想定、<http://www.city.kyoto.lg.jp/shobo/page/0000015600.html>、2003.
- 11) 岡田篤正・東郷正美・中田 高・植村善博・渡辺満久(1996)：1:25,000 都市圏活断層図「京都東北部」。国土地理院技術資料、D.1-333.
- 12) 宇佐美龍夫：「最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001」、東京大学出版会、2003.
- 13) 片尾浩：丹波山地における最近の微小地震活動の静穏化、京都大学防災研究所年報 48、B、167-174、2005.
- 14) 佐藤比呂志・平田直・岩崎貴哉・瀬瀬一起・伊藤潔・梅田康弘・伊藤谷生・笠原敬司・加藤直子：近畿地殻構造探査、大都市大災害軽減化特別プロジェクト成果報告書、538-553、2006.
- 15) 滋賀県文化財保護協会・財団法人滋賀県埋蔵文化財保護協会(2008)：琵琶湖西南部の湖底・湖岸遺跡 真野舟溜・浮御堂遺跡・穴太遺跡・唐崎遺跡・大江湖底遺跡、琵琶湖開発事業関連埋蔵文化財発掘調査報告書 8、2008.

