

特集
記事

琵琶湖疏水の耐震性を考える —琵琶湖西岸断層帯が活動した 場合の地殻変動と強震動の 影響—

編集委員会

企画・総括 飛田 哲男¹

1. はじめに
2. 琵琶湖疏水の歴史と現状
3. 疏水周辺の地震活動
4. 活断層と琵琶湖疏水
5. 大規模数値解析による地殻変動シミュレーション
6. 琵琶湖疏水周辺で地震が発生した場合における京都市の水供給
7. 琵琶湖疏水の耐震対策について～ロサンゼルス導水路の事例紹介と提案
8. おわりに

1. はじめに

川崎一郎²・飛田哲男¹

改めて指摘するまでもなく、琵琶湖疏水がなければ京都盆地は慢性的な水不足に陥る。盆地の底にいかにも豊富で良質な地下水があるとはいえ、今日140万の人口を抱える京都市の水需要に対して地下水のみで対応することはできない。また、逆に言えば、琵琶湖疏水による大量の上水の供給があったればこそ、京都市が今日のように繁栄できたともいえる。それは今から127年前、明治23年(1890年)の第1疏水の竣工、明治45年/大正元年(1912年)の第2疏水の竣工を経て今日に至る

まで、途切れることなく琵琶湖の水を市内に供給できたことの賜物である。その裏では、突発的な事故や、老朽化による補修が施されてきたのは言うまでもない。例えば、昭和5年(1930年)には、天智天皇陵裏の第1疏水左岸堤防が決壊し付近一帯の民家や田畑が浸水したことが記録されている(京都市水道局, 1990)。また、第1疏水第1トンネルは、昭和21年以降はほぼ毎年のように、鉄筋コンクリートの巻き立てによる部分補修が繰り返された(京都市水道局, 1990)。昭和40年代には第1疏水、第2疏水および疏水分線トンネルのほぼ全延長と危険性の高い開水路に根本的な補修が施されている(昭和の大改修)(京都市水道局, 1990)。もとより人工物である琵琶湖疏水を維持するにあたっては、定期的な補修が必要であることは当然である。しかし、第1疏水竣工以来今日までの127年間に、京都周辺で琵琶湖疏水を機能停止に陥れるほどの地震被害が発生しなかったことは、近年わが国で頻発する大地震による災害を顧みると、ひとえに幸運であったと言わざるを得ない。常時に非常時の備えをしておくことが防災の鉄則である。琵琶湖疏水が断絶した場合の影響を、その直後から時系列的に想定しておくこと、復旧に要する時間を最悪の場合を想定して見積もっておくことは重要である。それ以上に重要なのは、万が一経路の一部が断絶したとしても、最低限必要な水量を確保できるような対策をあらかじめ

¹ 関西大学

² 富山県立大学

じめ講じておくことである。

本特集の「琵琶湖疏水問題」とは次のような災害リスクを指している。もし、琵琶湖西岸断層帯南部（滋賀県大津市）で、地震調査委員会の長期評価の想定のような M7.5 の地震が起これば、琵琶湖疏水が断絶して京都市の上下水道が（従って消火用水も）途絶する。深刻なのは、過去の地震災害の時に比べて遙かに長期間にわたって、京都 140 万市民の生活を危機に陥れ、歴史都市としての都市構造を大きく損なう危険が存在することである。

頻発する地震災害を前に、地震学も活断層学も、そのあり方が問われているように思われる。

2011 年 M9.0 東北地震のあと、地震学会の中で、地震学は如何に社会に貢献できるのかを巡って真剣な議論がなされた。その中で、1 つの選択肢として、地震学の知識や成果を基礎に、先見的に災害リスクをあぶり出し、社会や行政に積極的に問題提起して、災害を未然に減らす努力を積極的に行こうという考え方も示された。私たちは、「琵琶湖疏水問題」は、その試みの 1 つであると考えている。

2016 年熊本地震は、活断層学にとって次のような意味で衝撃であった。地震調査委員会の長期評価では、布田川断層帯布田川区間（4 月 16 日の本震の震源域に対応）の活動間隔は 8,100 年～26,000 年、前回の活動が約 6,900～2,200 年前以前、50 年

発生確率は 0-1 % と見積もられており、日奈久断層日奈久区間（4 月 14 日の前震の震源域より南南西への延長部。今回、地震は起こさなかった）の活動間隔は 3,600 年～11,000 年、前の活動が約 8,400～2,000 年前以前で、30 年発生確率は 0-10 % と見積もられていた。つまり、極端な言い方であるが、「発生が強く危惧されていた日奈久断層日奈久区間を差し置いて、すでに活動してしまったと言えるような布田川断層帯布田川区間の方が先に地震を起こしてしまった」のである。このことは、活断層学が、過去数 10 年、各地で断層発掘調査を行い、素晴らしい知見を蓄積してきたにもかかわらず、1 つの活断層について 1 ヶ所や 2 ヶ所の発掘調査では、活断層について、本質的な要素の一部の欠如があり得ることを示唆しているように思われる。詳細は本特集の岡田の論考を参照されたい。

我々が、数年前に「琵琶湖疏水問題」を提起したとき（例えば、川崎（2012））、「地震調査委員会の長期評価では、琵琶湖西岸断層は既に 1185 年元暦地震の時に活動しており、100 年発生確率もほぼ 0 % なので心配はない」という楽観論の抵抗に出くわした。我々は、「断層発掘調査が行われたのは、琵琶湖西岸断層帯を構成する副断層のうち、堅田断層のみ。他の副断層、比叡断層と膳所断層では行われておらず、むしろ、状況証拠的には、比叡断層と膳所断層は 1185 年元暦地震の時に活動しなかった」と考えており、琵琶湖疏水が途

表1-1 東大地震研と京大防災研との拠点間連携共同研究「琵琶湖疏水の耐震性を考える－琵琶湖西岸断層帯が活動した場合の地殻変動と強震動の影響－」構成委員の役割分担と本特集の担当章（所属は当時）

飛田哲男 [代表] (はじめに, 第 7 章, おわりに)	京都大学防災研究所	総括・地盤構造解析
川崎一朗 (はじめに)	立命館大学	震源評価
岡田篤正 (第 4 章)	立命館大学	活断層評価
諏訪 浩 (第 2 章)	東京大学	地形および地盤条件評価
岩田知孝	京都大学防災研究所	強震動予測
堀 智晴 (第 6 章)	京都大学防災研究所	断水時の影響評価
釜井俊孝	京都大学防災研究所	斜面の安定性予測
片尾 浩 (第 3 章)	京都大学防災研究所	活断層評価
市村 強 (第 5 章)	東京大学地震研究所	地殻変動モデル構築
古川愛子	京都大学工学研究科	耐震構造解析
野原大督 (第 6 章)	京都大学防災研究所	断水時の影響評価
小田原興	京都市上下水道局	実務者からの助言
宮本勝利	日水コン	実務者からの助言

() 内は担当した章

絶した場合の深刻さを考えれば、長期評価にかかわらず着実に対策に踏み出すべきだと考えた。熊本地震は、地震が起こってしまったと考えられた断層で先に地震が起こる可能性がありうることを示し、着実に対策に踏み出すべきだという考えを一層裏付けたと言えよう。

以上のように、「琵琶湖疏水問題」は、地震学、活断層学、土木工学に関わる総合領域であり、学問のあり方が問われる試金石と言えよう。この特集が、地震学、活断層学、土木工学、行政、市民を巻き込んだ議論の第一歩となることを期待したい。

以下、第2章では、琵琶湖疏水の歴史的背景とその周辺の地形・地質に基づく災害リスクが議論されている。第3章では、琵琶湖西岸から京都盆地、北摂・丹波山地にかけての地震活動の特徴が紹介され、琵琶湖西岸・花折断層系が日本列島の主要なテクトニック境界であることが指摘されている。第4章では、琵琶湖疏水周辺に存在する活断層の活動度が紹介されるとともに、活断層の長期評価の問題点ならびに地殻変動に伴う湖水の移動の可能性が指摘されている。第5章では、大規模数値解析を利用した3次元有限要素法による地殻変動シミュレーションによる琵琶湖西岸断層帯を対象とした解析事例が紹介されている。第6章では、これまでの大地震による水道システムの復旧過程について事例が紹介され、琵琶湖疏水の機能が阻害された場合に想定される被害と事前の対応策について議論がなされている。第7章では、ロサンゼルス導水路の断層変位対策の事例が紹介され、琵琶湖第2疏水の耐震対策の提案と内挿管を布設した場合の試算例が示されている。

最後に、本特集は、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の連携による「平成26-27年度拠点間連携共同研究－課題申請型研究」で採択された研究課題「琵琶湖疏水の耐震性を考える－琵琶湖西岸断層帯が活動した場合の地殻変動と強震動の影響－」（委員構成：表1-1）の活動成果の一部である。記して謝意を表する。

参考文献

- 京都市水道局、琵琶湖疏水の100年〈資料編〉、255p., 1990
- 川崎一朗・岡田篤正・遠田晋次・小松原琢、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、歴史都市防災論文集、6、97-103, 2012.

2. 琵琶湖疏水の歴史と現状

諏訪 浩³

琵琶湖疏水は、大津市三保ヶ崎で琵琶湖から取水し、山科盆地北端を西進、京都市蹴上を経て松ヶ崎や伏見に至る人工の水路である。全区間、自然流下の状態で水を運ぶ(図2-1、図2-2参照)。京都市の給水人口147万人に日最大62万 m³の水を供給する。過半は上水用であるが、水力発電や産業用、灌漑、防火用、庭園池水などにも利用されている。この水利用に対し、京都市は滋賀県と契約を交わし、琵琶湖疏水感謝金を滋賀県に支払っている。その額は、2015年度からの10年間は年額2億3千万円である。

2.1 疏水とその用途

琵琶湖疏水は、第1疏水とその分線、鴨川運河、第2疏水などからなる。第1疏水は明治18年(1885)着工、明治23年完成である。取水量は8.3 m³/s。明治27年(1894)に開通する鴨東運河を経て伏見で宇治川に至る水路をあわせると、総延長20 kmである(図2-1)。蹴上と伏見の、比高が大きな傾斜地にはそれぞれインクラインを設け、また途中11箇所に閘門を設けて、琵琶湖の水面標高84 mと宇治川伏見の水面標高11 mとの標高差を克服し、大津と伏見の間に舟運を実現した。しかし、すでに陸上交通大発展の時代が始まっていた。間もなく舟運の需要は縮小してゆく。大津から伏見までを通しての舟運は昭和10年(1935)頃には姿を消した。

明治24年(1891)には、我が国最初の事業用水

³ 東京大学空間情報・立命館大学歴史都市防災

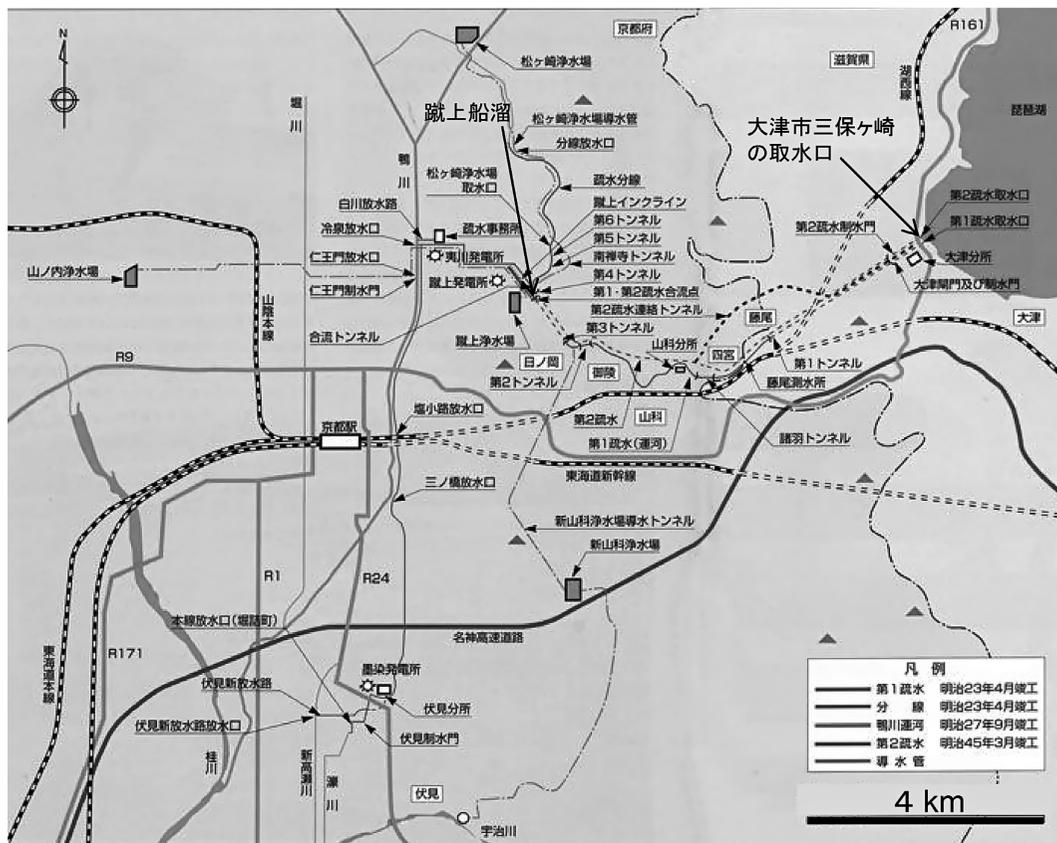


図2-1 琵琶湖疏水ルートと関連施設の配置 (琵琶湖疏水記念館 HP 掲載の図に加筆)

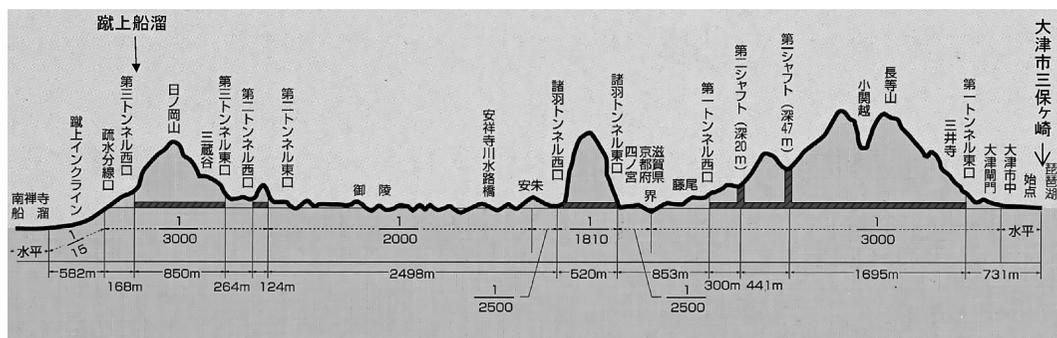


図2-2 琵琶湖第1疏水断面概念図 (琵琶湖疏水記念館 HP 掲載の図に加筆)

力発電所が稼働を始めた。そして、電気が水車に代わる産業用動力源になってゆく。明治28年には我が国最初の電車が、現在のJR京都駅と伏見を結ぶ区間で開業した。蹴上と夷川、伏見の発電所

ほかの京都市営の電気事業は、その後、昭和17年(1942)に関西配電(後の関西電力)に移管されるまでは京都市営であった。

配電が始まると、インクラインに、産業用動力

源に、電車の延伸営業に、電灯にと電力需要は急速に増大してゆく。これに応じるため、第2 疏水を建設して給水量を増やすことになった。そして同時に上水道を導入する。ちなみに、明治の半ばまでは上水利用は計画されなかった。飲料水は豊富な井戸水に頼っていたことも理由の一つである。しかし、都市化の進行とともに井戸水の水質は徐々に悪化して、衛生上の問題が深刻化した。とくに、明治28年(1895)に内国勸業博覧会が京都で開催されたときにはコレラなど伝染病の流行が問題になった。伝染病問題を解決するためには上水道や下水道を導入して、衛生環境を改善することが大事である、との認識が広がる。議論のすえ、下水道を整備することにした。しかし建設経費が過大で工面できないことがわかり、下水道の導入は後回しとなる。代わりに上水道を導入することになった。第2 疏水は明治41年(1908)に着工し、明治45年に完成した。この年、蹴上浄水場が完成し、給水を開始した。

第1 疏水では、3 区間でトンネルが用いられたが、基本的には開水路が採用された。舟運や水路管理を考えれば開水路が有利である。しかし、第2 疏水は、上水道導入に伴う水質保全の必要性もあり、全区間トンネルで計画・施工された。取水量は15.3 m³/s で、第1 疏水と合わせると給水量は23.6 m³/s となった。蹴上、松ヶ崎、山科、山之内、伏見に順次浄水場が建設され、上水需要の増大に対応していく。蹴上浄水場は、上水需要の増加を見越し、浄水能力が高い急速濾過式を採用した。急速濾過式の採用は我が国ではこれが最初である。

京都市の上水道インフラ導入は、我が国主要都市の中では早いほうではない。量的には豊富な井戸水を使う市民が、料金を支払ってまで上水を利用するだろうか、との声が強かったためである。しかし上水の給水が始まると、井戸水から上水依存へと順調に移行していった。今では生活用水として井戸水を利用する市民はごく僅かである。

しかし、平成7年(1995)兵庫県南部地震では水道施設の損傷が起きて126万戸あまりで上水道の途絶が起き、復旧におよそ3ヶ月を要した。こ

れを契機に全国いくつもの都市で“災害時協力井戸制度”が創設されるようになった。京都市はM7程度の直下型地震に見舞われると水道管の破損などで52万戸で断水し、全面復旧には1ヶ月半を要すると想定している。その場合は井戸水利用を可能とするため、平成16年(2004)に“災害時協力井戸制度”をつくり、登録を呼びかけてきた。飲料用井戸は市内に少なくとも2,321箇所あるが、このうち618箇所が平成25年(2013)10月までに登録され、所有者の建物玄関などに「災害時協力井戸の家」と記すステッカーが貼られている(京都新聞, 2013)。

2.2 疏水の建設

琵琶湖疏水建設の経緯は京都市水道局(1990)や小野良朗(2015)などに詳しく著されている。それらによれば以下のようである。

琵琶湖から京都へ水を引くという構想は明治になって初めて登場したわけではない。大津・京都間に水路を開鑿して舟運をひらき、田畑を潤すという夢は平清盛や豊臣秀吉の頃からあったという。しかし、史料として記録が残るのは、寛政の末、すなわち1800年頃、天保12年(1841)、文久2年(1862)、明治5年(1872)、明治6年、明治7年のものである。いずれも、舟運をひらくことが第1目的であった。すなわち、大津京都間の、人馬に頼る物流が物価高を招いているとして、安価な舟運を開き、この問題を解消しようというものである。

しかし、江戸期の計画は開鑿路線を示す図面はあっても、工事の実現に向けた検討がなされた形跡がみられない。いずれも水を自然流下させることが不可能な箇所を含む路線計画であるなど、実現性に乏しいものであった。明治期になると、工事費の見積もりや算段の交渉が行われるようになる。しかし、内容が経費面であるいは技術面で実現不可能なもの判断され、疏水建設を求める建議や願書が地方政府あるいは中央政府に受け入れられることはなかった。

明治2年(1869)に都が京都から東京に移って以降、産業や経済など、京都という都市を衰退さ

せずに盛り立ててゆくにはどうすればよいか、当時、重要課題となっていた。都市の繁栄には、水需要を安定的に満たすための水供給インフラが欠かせない。京都の地下には琵琶湖が湛えるほどの量の水があると云われている。それは概ね正しい。しかし、それは湖水ではなく地下水である。地表を流れる水のように、効率よく利用するのは難しい。京都の水需要を満たすには鴨川などの川水と地下水だけでは不足していた。琵琶湖から疏水をひき、京都の町に表面流水をひくことができれば、様々な利用が可能となり、京都を活性化することができる。舟運、御所用水、灌漑用、防火用、水車動力（工業用動力、脱穀など）、産業用などである。

明治14年（1881）、京都府知事に就任した北垣国道は琵琶湖疏水開鑿の重要性を認識し、疏水路線の調査・測量、設計に着手する。北垣は、明治新政府のもとで開拓使として北海道や樺太に在勤し、その後も高知県令として務める中で土木インフラ事業に関心を持ち、この分野に知己を広げていた。このような背景が琵琶湖疏水計画実現への好条件となった。そうした中、明治20年に、これら業務の一切の責任者となったのが田辺朔郎である。田辺は、工部大学校（後の東京大学）を明治16年に卒業した。「琵琶湖疏水工事」と題する卒業論文で工学士の学位を授与されている。疏水工事の実施に際しては、計画にいくつも変更・修正が加えられてゆくが、この論文は、疏水工事計画の基となった。

田辺は、卒業と同時に京都府に採用され、疏水実現のための業務に従事していた。最新の水利技術を学び、取り入れながらの仕事であった。たとえば、明治21年（1888）には渡米して水力発電所などを視察した。帰国した田辺は、さっそく蹴上に水力発電所を建設するなどの設計変更を加える。明治24年には蹴上発電所が完成し、送電を開始した。我が国初の事業用水力発電である。その4年後、京都電気鉄道による京都～伏見間での営業が始まる。我が国最初の電車運行である。

琵琶湖疏水の建設は当時の土木事業の中では異色である。その頃の我が国の大土木事業は、例え

ば福島県の安積疏水（明治15年（1882）完成）がそうであったように、オランダから招聘された技師らの指導のもとで調査・設計が進められていた。しかし、琵琶湖疏水は調査・設計から施工の全般を日本人の力だけで実現している。特筆される点である。

琵琶湖疏水建設の目的となった項目として、舟運、発電、上水と見てきたが、もう一つ見逃せない重要な項目がある。それは防火用途である。明治23年の第1疏水完成とともに第1疏水の分線は現在の北区や左京区に広がる田畑を潤し、御所用水につながれた。御所用水とは次のようなものである。すなわち、明德3年（1392）に御所が現在の位置に定まって以降、御所のための用水は鴨川上流から水路で御所まで引いていた。この御所用水の第1目的は防火用であった。途中の小山村の田畑の灌漑にも利用されていて、湯水期には水量が低下し、途中で涸れて、用水が御所まで届かないこともあった。したがって、御所用水への安定的な水供給は、疏水開鑿計画の大義名分の一つになっていた。

疏水の水は御所のほかにも多くの場所で防火用として利用されてきた。例えば本願寺水道をあげることができる。第1疏水完成の5年後に、蹴上船溜の貯水池から東本願寺まで鑄鉄管路を用いた防火用水道がつくられた。この水道は現在も使われている。いっぽう、第二疏水の明治45年（1912）竣工と同じ年に御所水道が完成した。御所水道は、蹴上の大日山に新たに設けた貯水池から京都御所まで鑄鉄管を埋設してつくられた。御所を火災から守るための防火用で、標高72.7 mの紫宸殿に対しても有効な放水能力を発揮させるように設計されている。すなわち、蹴上船溜そばに専用の九条山ポンプ場を設け、第二疏水出口標高81 mの水を標高113 mの貯水池までポンプアップし、そこから御所へ向けて圧力送水することにした。九条山ポンプ場の建屋は、煉瓦造の美しい洋館である（写真2-1）。しかし、この御所専用水道送水管は年を経て老朽化したため、平成4年（1992）に役目を終え、御所の防火用水や庭園池水の水源は地下水に切り替えられた。

2.3 文化財でもある社会基盤設備

琵琶湖疏水の水路やトンネル、関連施設は周囲の景観と調和するように設計、施工されている。写真2-2は南禅寺境内を北流する疏水分線の一部で、水路閣と称されている。山科の第1疏水べりや、蹴上から夷川ダムへかけてのインクラインを含む地区、哲学の道と称される疏水分線べりは長らく地域住民の散策や憩いの場であった。近年は内外の観光客が数多く訪れるところとなり、大変な賑わいである。現在は形態保存されているだけの蹴上インクラインなどを含め、造られてから120年以上経過してはいても、琵琶湖疏水は今なお活用され続ける社会基盤設備である。昭和58年(1977)に京都市の史跡に、また平成8年(1996)には施設12箇所が国の史跡に、また平成



写真2-1 蹴上船溜そばの九条山ポンプ場建屋。手前のトンネルは第2疏水トンネル西口。建屋前の第1疏水水路は一時的に水が抜かれていた（撮影2017年2月25日）



写真2-2 南禅寺水路閣（第1疏水分線の水路橋）。2017年2月25日撮影

19年(2007)には国の近代化産業遺産に指定された。文化遺産として、また現役の文化財として高く評価されている。

2.4 建設地の地形と地質、ハザード対策

京都盆地と近江盆地はその間を南北方向に連なる山地で境されている。この山地のうち、京都の市街地のそばにあるのが比叡山地である。疏水は、琵琶湖南端近くの三保ヶ崎に取水口を置き、比叡山地南麓斜面の、標高が84 mから82 mの等高線に沿うように配されて蹴上に至る。この辺りの基盤岩は丹波帯と称し、ジュラ紀すなわち1億5千万年ほど前までに形成された付加体、すなわち堆積岩である。そして比叡山山頂付近と、五山送り火で知られる大文字山や如意ヶ嶽とに挟まれる部分は花崗岩である。白亜紀の、今からおよそ9千5百万年前に起きたマグマ貫入による。高温マグマの接触により周辺近傍の堆積岩は“焼き”が入り、堅くて風化・侵食されにくいホルンフェルスに変化した。比叡山頂付近と如意ヶ嶽付近が周りより高くなっているのは、このようなホルンフェルスが分布しているためである。服部嵐雪が「布団着て寝たる姿や東山」と詠むことになった京都東山三十六峰の眺望は、このような地質規制で生まれた。

この京都と近江を限る山地の南北方向の活断層群の活動で山地と盆地が形成された。すなわち花折断層をはじめとする山地西縁の断層群と東縁の琵琶湖西岸断層帯の断層群の、この百万年ほどの間の逆断層運動の繰り返しで、地塁と称する断層地塊が形成されている。この地塊を造る二つの断層帯をこの疏水は横切る。その詳細は、第4章「活断層と琵琶湖疏水」に述べられている。断層は、岩盤が破碎された層、断層破碎帯となっている。たとえば、トンネル開鑿に際して落盤を起こしやすい。第4章でも述べられているように、第1トンネル工事中の明治21年(1888)10月5日に大津側坑口から16 mのところでは落盤が起き、坑夫ら65名が46時間ものあいだ閉じこめられるという事故が起きている。落盤が断層破碎帯の部分で起きたのかどうかは判らない。活断層や断層破碎帯と

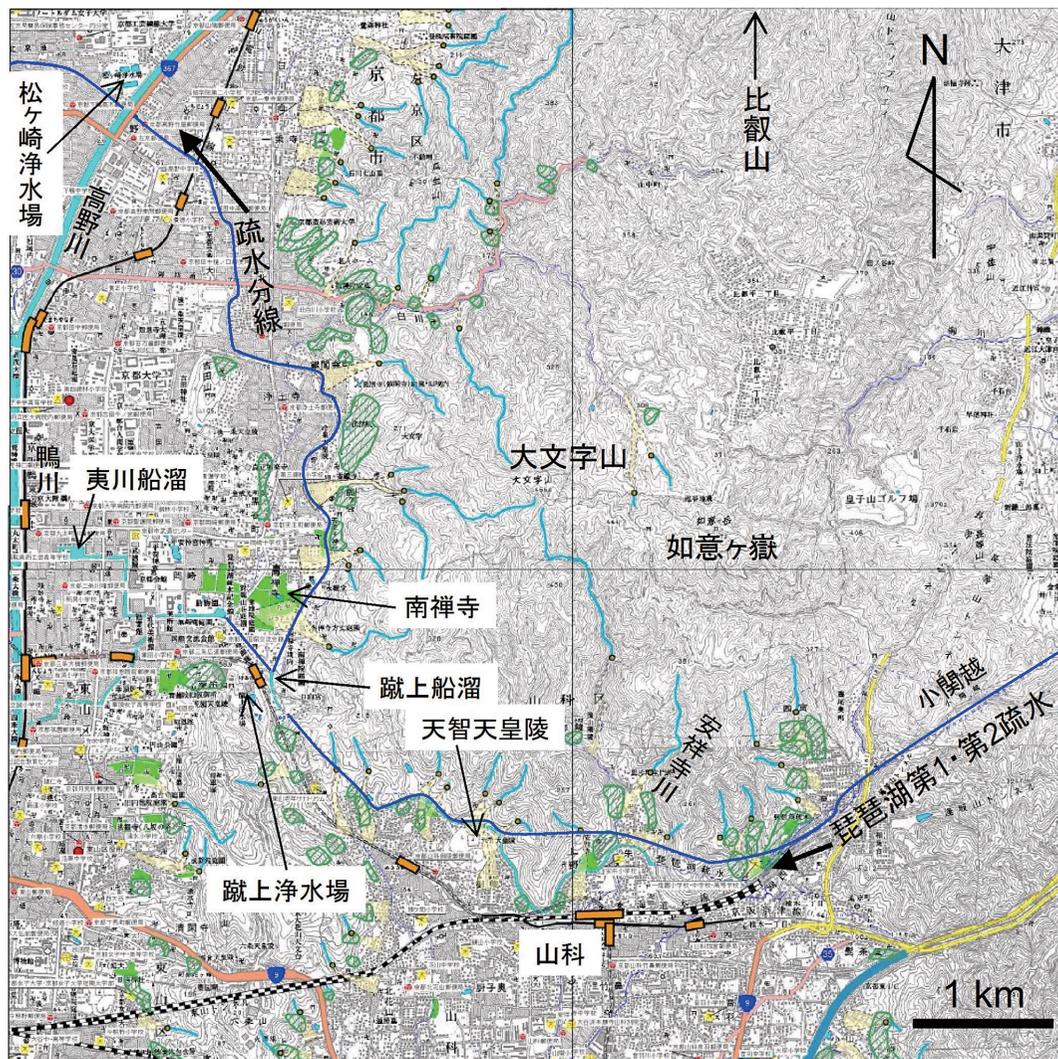


図2-3 疏水の径路と急傾斜地，土石流発生溪流の分布（京都市土砂災害点検マップに加筆。水色で示す溪流の先の黄色い扇形で土石流危険域を，緑色斜線領域で急傾斜地を示す）

いう事象が認識されるようになるよりもずっと前のことである。この箇所を含め，活断層の精確な位置確認や活断層が動く場合の対策の検討が課題である。

琵琶湖疏水が大津市から京都市へ入ると，第1疏水は開水路と4つのトンネルでつながる（図2-2）。一つは諸羽トンネルである。安祥寺川を横切る箇所と天智天皇陵の水路は，昭和45年（1970）に諸羽トンネルに付け替えられた。それ

までこの部分は，尾根部分を等高線に沿い，平面パターンがおおむねV字の形の開水路であった（図2-3）。尾根部斜面の麓に国鉄湖西線を通すことになったのに合わせて，諸羽トンネルが開鑿された。そして，この区間の開水路は使用を終え，諸羽トンネルに付け替えられた。旧開水路から麓までの随所に現在，斜面安定化のための対策工が施されている。

琵琶湖疏水は，第1章と第4章で述べられてい



写真2-3 左から第1疏水に合流する、第2トンネル東口近くの溪流末端に設けられている沈砂池（撮影：2014年11月23日）



写真2-4 第1疏水第2トンネル東口近くに施工された、疏水堤体斜面のロックボルトによる安定化工（撮影：2014年11月23日）

る活断層変位による破断や自然流下条件の阻害が起きるリスクを抱えるだけでなく、つぎに述べるようなハザードのリスクを沿線の地区に用意しているとも云える。疏水の路線を見てみよう。疏水は三保ヶ崎の取水口から暫くは沖積地盤に穿たれている。西へ進み、山麓の丘陵あるいは緩斜面では古琵琶湖層の区間であり、琵琶湖西岸断層を通過するところからは丹波層となる。西へと蹴上まで続く疏水と蹴上から北上する疏水分線は図2-3に示すように、十数箇所でも谷筋を横切る。すなわち、第1疏水は大雨の際に急出水や土砂流、まれに土石流が流下してくる箇所を含む。安祥寺川や天智天皇陵西隣の溪流は、たとえば昭和10年(1935) 京都大水害の際に洪水や土砂流、土砂崩

れが起きて下流の地区に被害をもたらした。このような溪流の疏水山側には、今は濁水や土砂の流出に備えるための沈砂池が設けられている箇所もある(写真2-3)。開水路が住宅地のそばに急傾斜地を成す箇所にはロックボルトを用いて斜面の安定化が図られている箇所もある(写真2-4)。しかし、疏水と山地小溪流、不安定な急斜面の交錯する場所のすぐそばまで宅地利用が進んでしまっている。対策は十分であるようには思われない。疏水沿い地域の大雨や地震による災害リスクの調査とその評価、対策に向けての総合的な検討が必要ではないかと思われる。

参考文献

- 京都市水道局疏水事務所(1988) 琵琶湖疏水, 27p.
 京都市水道局(1990) 琵琶湖疏水の100年(叙述編 705p., 資料編255p., 画集2頁にまたがる絵画 32葉など160p.), 京都新聞社編集.
 京都市(2005) 京都市災害時協力井戸制度, 京都市消防局防災危機管理室, 京都市印刷物第170070号, 6p.
 京都市上下水道局(2009) 琵琶湖疏水記念館常設展示図録, 61p.
 京都新聞(2013) 京都市民の生活用水, 2013年10月22日朝刊記事.
 小野良朗(2015) 水系都市京都-水インフラと都市拡張-, 思文閣出版, 290p.
 京都府建設交通部 HP, http://dobokubousai.pref.kyoto.jp/sabo/map_tenken/index.asp, 土砂災害警戒箇所点検マップ, 2017年2月26日閲覧。
 京都市琵琶湖疏水記念館 HP, <http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000007524.html>, 2017年2月26日に閲覧。

3. 疏水周辺の地震活動

片尾 浩⁴

琵琶湖疏水の流れる琵琶湖西岸から京都盆地にかけては, Sagiya et al. (2000) により提唱された「新潟神戸歪み集中帯」の一翼を担う場所であり, 日本列島における最も活発な変動帯の一つであ

⁴ 京都大学防災研究所

り、日本列島規模の地震テクトニクスを論じる上でも重要な地域である。本章では、おもに現在の微小地震活動を軸に、疏水周辺地域における地球物理学的な背景を概観する。

3.1 微小地震活動

近畿地方北部の北摂・丹波山地（大阪府北部～京都府中部）は、定常的に微小地震活動が活発な地域である。この地震活動は極めて定常的であ

る。震源の深さは5～15 kmの地殻上部に集中しており、近年はマグニチュード5クラスを最大としてそれを超える大地震は発生していない。近畿地方には活火山が無く、特定の活断層に沿わず面的広がりを持つ定常的な地震活動は、日本列島においてもあまり類例のない特異なものと考えられる（片尾, 2002）が、その原因についてはほとんど分かっていない。

丹波山地の北東方に隣接する花折断層以東の琵琶

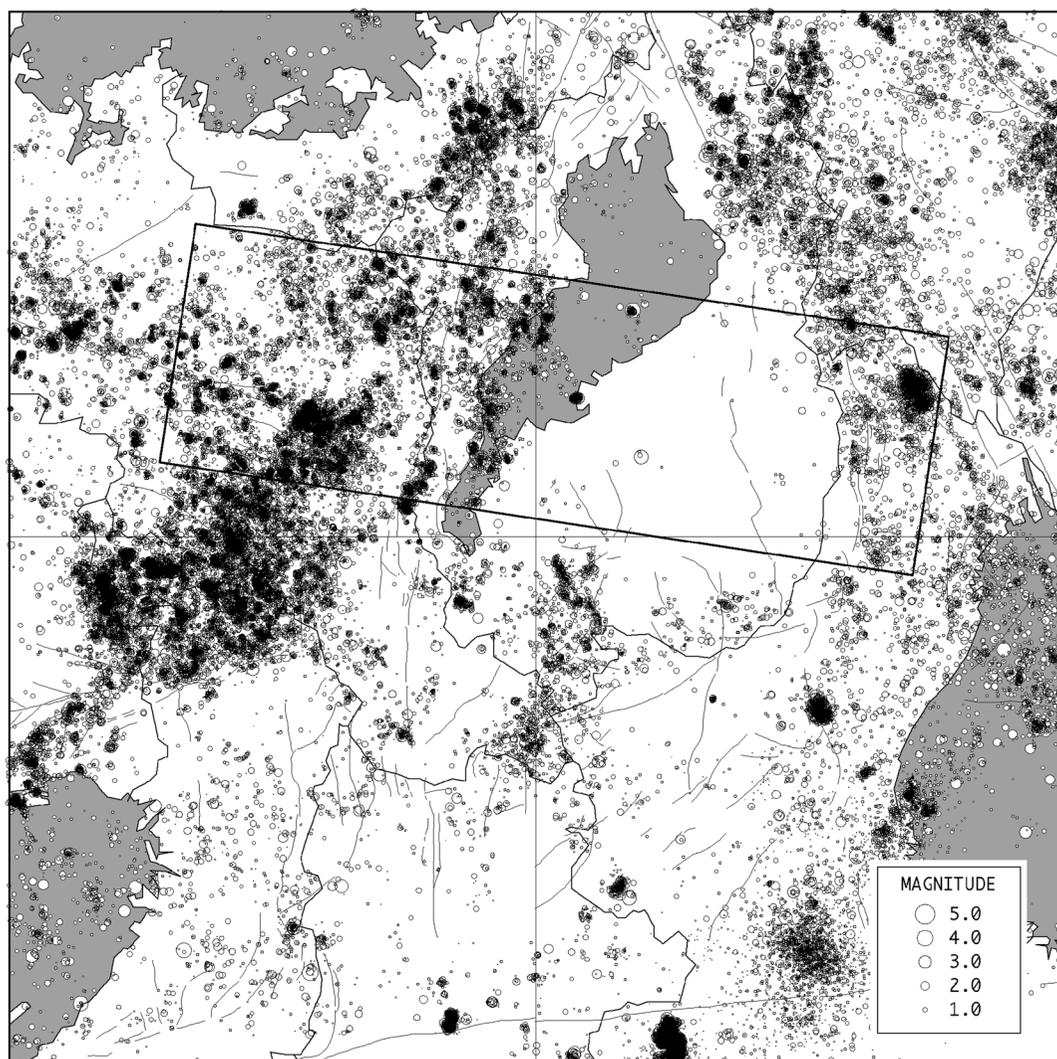


図3-1 近畿地方北部の微小地震の震央分布。1997年10月～2012年12月31日。深さ40 km 以浅。気象庁一元化カタログに基づく。

琵琶湖西岸域でも定常的に活発な微小地震活動が見られるが、地震発生数は丹波山地よりも少ない [Fig.3-1]。また地殻内の微小地震の発生する深さは、丹波山地では深さ15 km 付近が下限であるが、琵琶湖西岸では東に行くほど深くなり、琵琶湖直下では約20 km に達する。地震発生層の下限の深さは徐々に変化して行くのではなく、花折断層付近を境に東西で段差があるようにも見える。また同時に、地震発生深度の上限も深くなっている [Fig.3-2]。微小地震活動域は、琵琶湖西岸で画されることなく、湖岸断層の下盤側である湖の中軸近くまで達している。

一般に日常的に発生する微小地震は、大地震の余震のように1枚の平面に分布するというのではなく、空間的に散在している。したがって、この地域でも微小地震の震源分布から、琵琶湖西岸断

層系など活断層の地下における形状を知ることはできない。西落ちの逆断層である琵琶湖西岸断層が、わずか数 km の間隔で平行する横ずれ断層である花折断層と地下でどのような幾何学的関係にあるのかも興味深い。表層近くの構造探査結果(大都市大震災軽減化特別プロジェクト, 2007a) で得られている比較的浅い角度で西落ちの琵琶湖西岸断層は地震発生深度に達する前に花折断層と交差することになるので、この傾斜角がそのまま地下深部にも延長しているとは考え難い。

それより東側の琵琶湖東岸～近江盆地では、微小地震観測が始まった1970年代後半以来ほとんど微小地震は発生しておらず、西方に隣接する琵琶湖西岸から丹波山地にかけての活発な地震活動域とは際立った対照を示している [Fig.3-3]。丹波山地の定常的で活発な活動とともに、近江盆地域

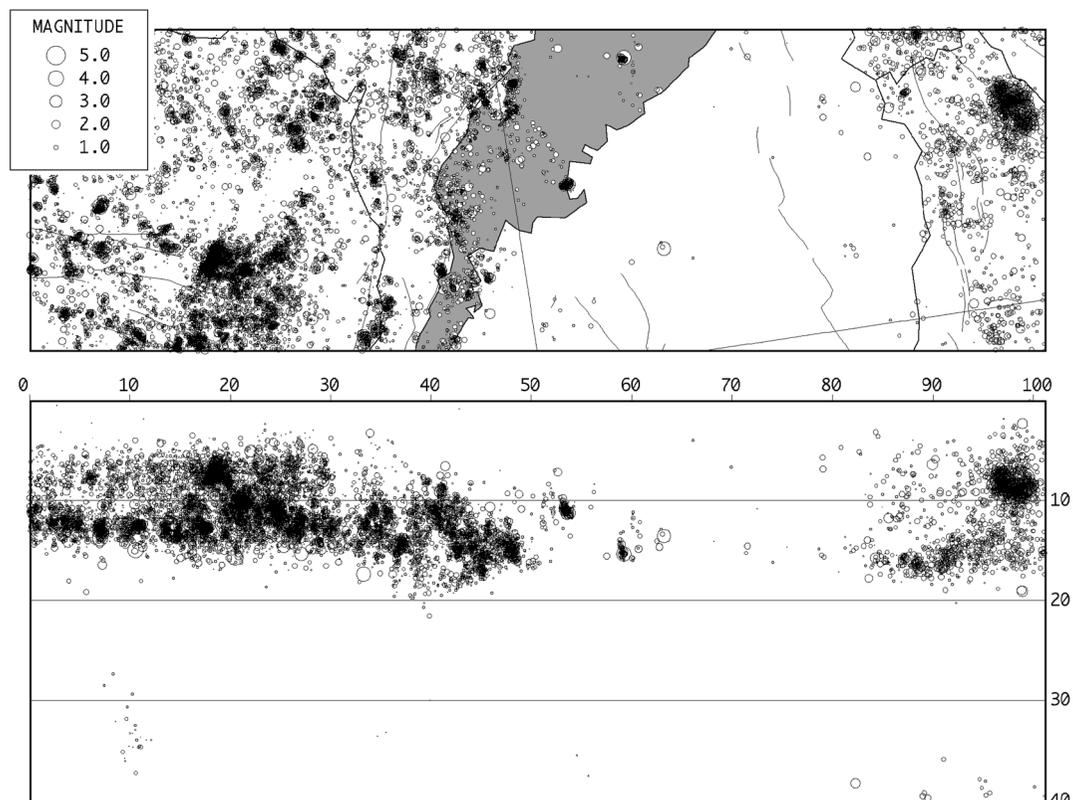


図3-2 図3-1内の矩形範囲の震央分布(上)と、同範囲の垂直断面図。(下)。1997年10月～2012年12月31日。深さ40km 以浅。気象庁一元化カタログに基づく。震央図における細線は活断層の地表トレース。

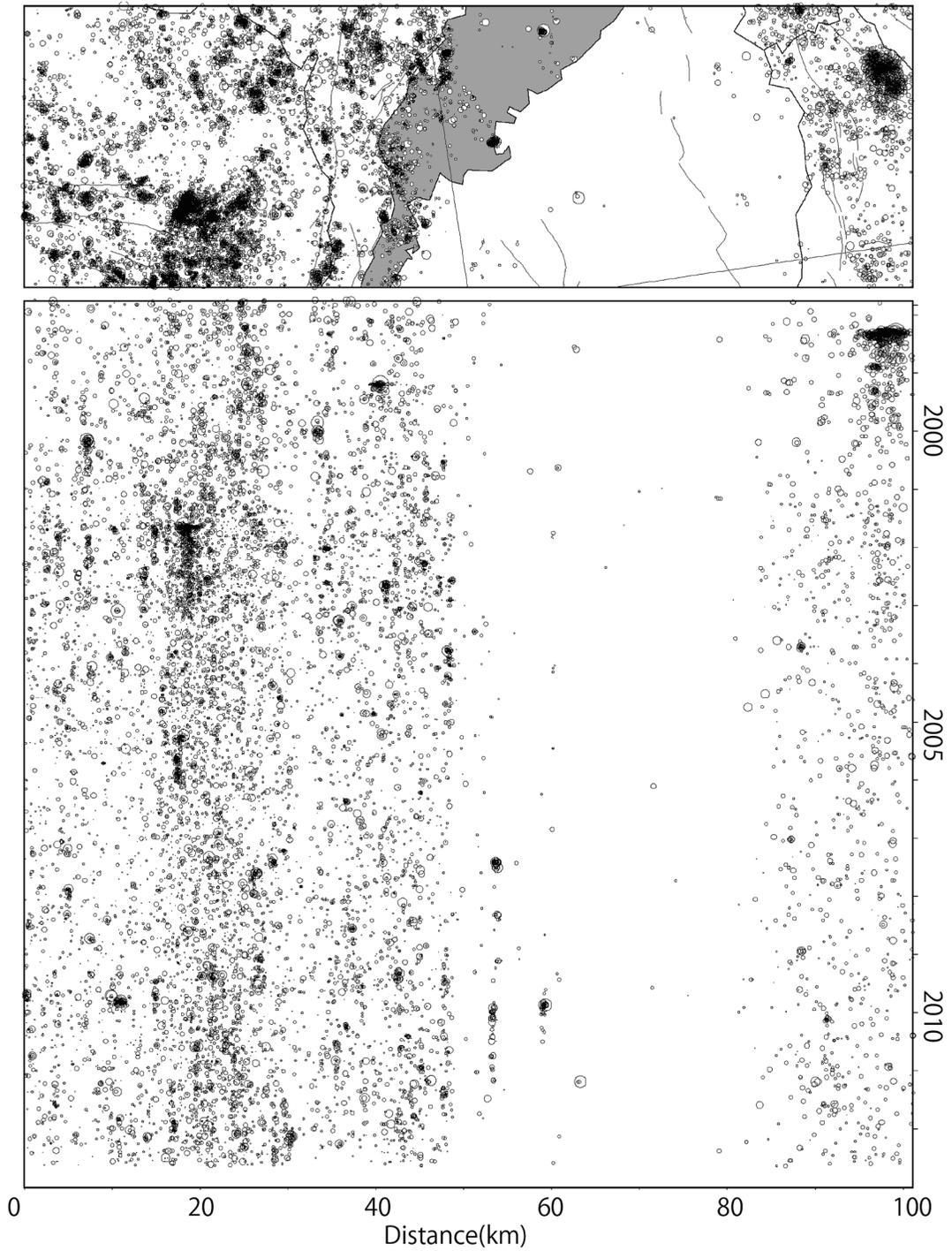


図3-3 図3-1内の矩形範囲の時空間分布図。横軸は図3-1内の矩形の長辺に投影した距離，縦軸は時間。1997年10月～2012年12月31日。深さ40 km 以浅。気象庁一元化カタログに基づく。

における極めて低い活動の原因も同時に解明されるべき現象であると考えられる。

3.2 発震機構・応力場

青木 (2012) は、次節で詳述する臨時稠密観測の微小地震波形データを使い、初動の押し引き分布から精密な発震機構解を求めた。高い観測点密度によって、気象庁マグニチュード0.5以上の地震についてはほぼ洩れなく精度の良い解が得られることを示した [Fig.3-4]。大量の発震機構解に基づいた応力テンソルインバージョンによって、近畿地方北部の応力場の空間的な分布を求めた。その結果、琵琶湖西岸地域は一貫して東西圧縮の逆断層的な応力場であるのに対し、花折断層より

西方の丹波地域では東西圧縮の σ_1 は共通しているながら、 σ_2 , σ_3 がほぼ同じで区別しにくい応力場であることが示された。Terakawa and Matsu'ura (2010) によって求められた日本列島の広域応力場でも、「近畿三角帯」の内部は東西圧縮の逆断層場であるのに対し、その周辺では横ずれ断層場になっている境界部分が琵琶湖西岸地域である。

個々の地震の発震機構解をみても、琵琶湖西岸地域においては概ね東西圧縮の逆断層が卓越している (藤野・片尾, 2009) が、これらと琵琶湖西岸断層とはどういう関係にあるのだろうか? 琵琶湖西岸地域で得られた発震機構の中から P 軸方位がほぼ東西で、2つの節面の走向がほぼ南北のもの (150~210°) つまり、南北走向の西下がりの逆断

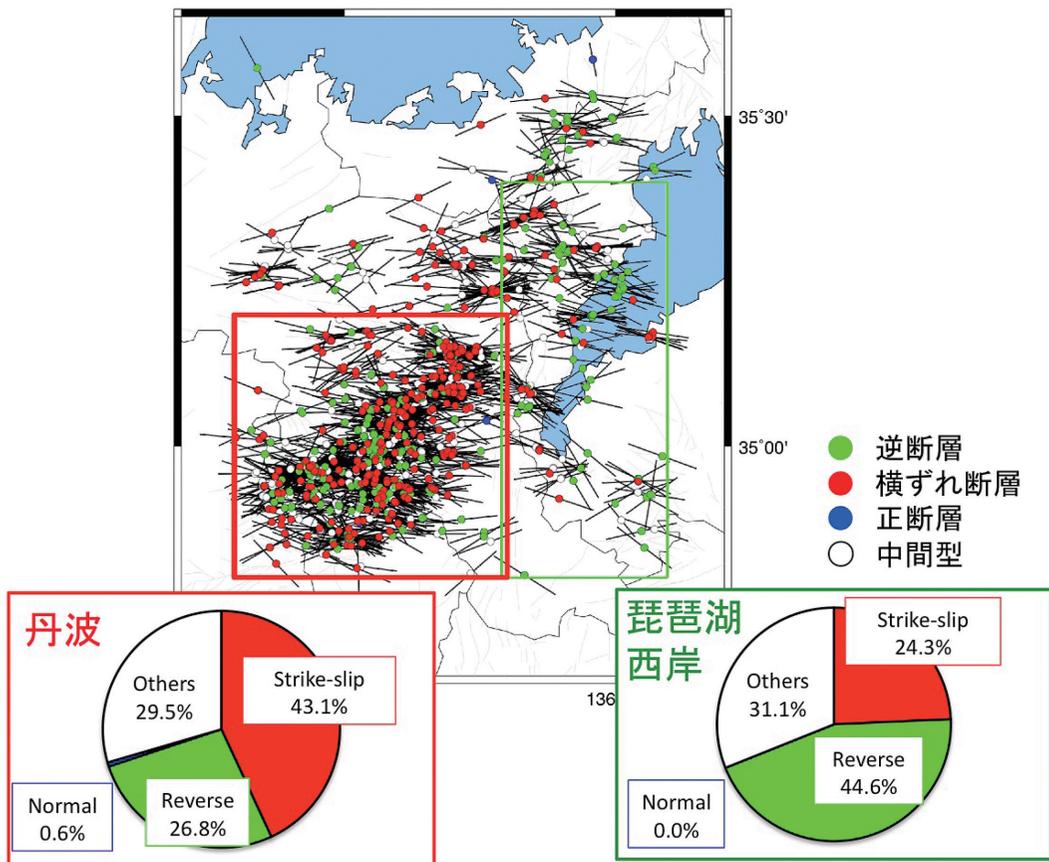


図3-4 青木ほか (2012) による、丹波山地・琵琶湖西岸地域の発震機構。○の色で発震機構のタイプを、○を貫く線により P 軸の方位を表す。丹波山地および琵琶湖西岸地域における断層タイプの比率の円グラフ。

層面を選び出すと、その断層面傾斜角はほぼ45°の西落ちが卓越していることがわかる。むしろ、散在して発生しているこれらの微小地震の滑り面が、琵琶湖西岸断層の断層面と一致するはずもないが、この地域の応力場や活断層の運動および発達過程を考える上で重要であろう。

3.3 稠密地震観測の結果と関連する地球物理学的観測データ

琵琶湖西岸から丹波山地にかけての地域では、2008年末より文科省の「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究」や2010年4月からの「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」における「近畿地方北部における地殻活動異常と地震先行現象の関係の解明」の一環として、80点を超える臨時震時観測点を設けて観測を継続している（三浦ほか、2010；飯尾、2010）。丹波・琵琶湖西岸地域のみならず、従来から地震観測点が希薄であった近江盆地東部にも太郎坊宮、荒神山、多景島などの良質の岩盤露出地に臨時観測点を設けた。琵琶湖西岸付近における観測点間隔は5 km 以下であり、従来の観測点密度をはるかに凌駕する。稠密観測を実施することにより、この地域の地下構造を高解像度で把握し、地震活動の原因およびその時間変化の要因をさぐることを目的である。

3.3.1 地震波速度構造

稠密観測データを基に、グリッド間隔0.1度以下のトモグラフィ解析により高解像度の3次元地震波速度構造が推定されている（海谷ほか、2014）。P波およびS波速度構造には、概ね丹波地域の微小地震が活発な領域に重なるように、かつ地震発生層の下端に沿うように低速度異常が見られた。地震発生層上部は比較的高速度で、浅部では琵琶湖西岸から丹波地域や大阪平野にかけて帯状に低速度異常が広がっている。琵琶湖西岸地域の深さ3 km 以浅には、帯状に広がる高Vp/Vsかつ低S波速度域が存在する。地震発生層下部における低速度は、地殻内流体の局所的な分布が地震活動にも影響していることを強く示唆している[Fig.3-5]。また浅部の帯状の低速度分布は、従来の疎らな観測点分布の解析では見られなかったもので、活断層や表層地質に対応している可能性がある。

3.3.2 下部地殻反射面

北摂・丹波地域の微小地震では、初動の9～12秒後に顕著な後続波が観測される例が多く見られ、それらは深さ約20～25 km の間に存在する北に傾斜する反射面から反射してきたS波であることが知られている（片尾、1994；片尾、2005；

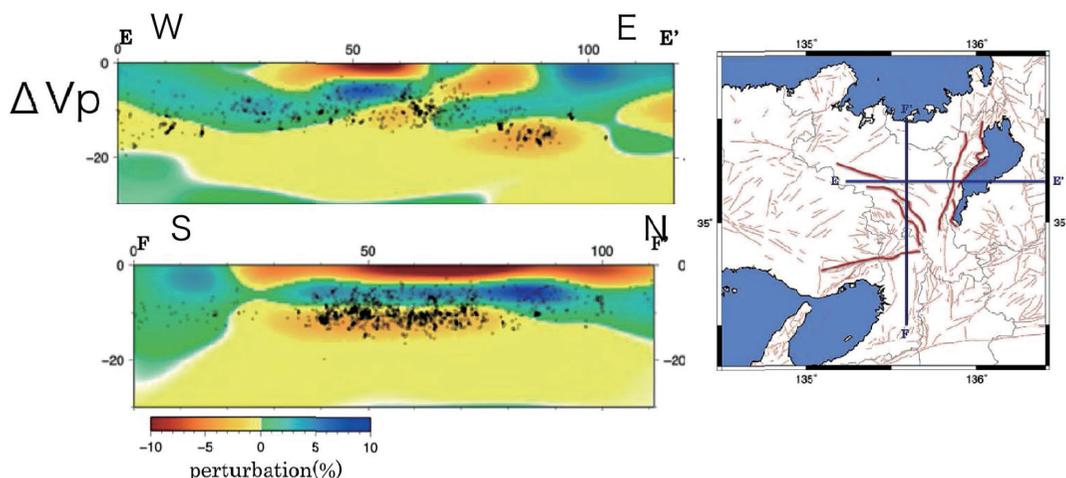


図3-5 トモグラフィによる3次元地震波速度構造。(上)東西測線、(下)南北測線の垂直断面について、P波速度の各深度における平均からの偏差を示す。(海谷ほか、2014)

片尾ほか, 2007; Aoki et al., 2016)。琵琶湖西岸寄りの地域にも断片的な反射面が存在する可能性はあるが、丹波直下のものほど顕著なものは見当たらない。コーダ波から推定された散乱強度分布では琵琶湖西岸を含めた近畿北部の微小地震発生域下の下部地殻に広く強い散乱が認められる(大都市大震災軽減化特別プロジェクト, 2007b)。

3.3.3 モホ面およびフィリピン海プレート

稠密観測データを用いたレシーバファンクション解析により、下部地殻から上部マントルに至る構造イメージが行われた(佐々木, 2011)。これも従来の定常観測では、観測点が疎らであるため鮮明なイメージが得られなかったが、稠密観測により波線密度の高い鮮明なイメージを得ることができるようになったものである。丹波地域・琵琶湖西岸の下のフィリピン海プレートは、急激に西下がり傾斜している様子が捉えられた。この地域では沈み込むフィリピン海プレート内では地震は発生しておらず、震源分布からプレート形

状を知ることはできない。プレート上面の深さは、北摂・丹波山地の下では60~70 kmに達しているが、西下がりの傾斜を東方の近江盆地へ外挿すると深さは40 km以浅となり、ほぼモホ面に接する位置にあることが分かる。

3.3.4 比抵抗構造

花折断層帯および琵琶湖西岸断層帯を東西方向に横切る測線で行われた電気比抵抗観測によると、花折断層を境に西側の丹波山地では地殻浅部まで低比抵抗であるのに対し、琵琶湖側は比較的高比抵抗であることが示されている(吉村ほか, 2005)。これまで各地で行われた比抵抗構造探査によって、主要な活断層のほぼ直下の下部地殻には低比抵抗帯が存在する例が多く、断層の動きや地殻流体の働きに関連のあるものとされている。一方、花折断層西方の低比抵抗帯はほぼ地表近くまで達していること、断層を境に東方は高比抵抗であるという非対称な構造を呈することに特色がある[Fig.3-6]。

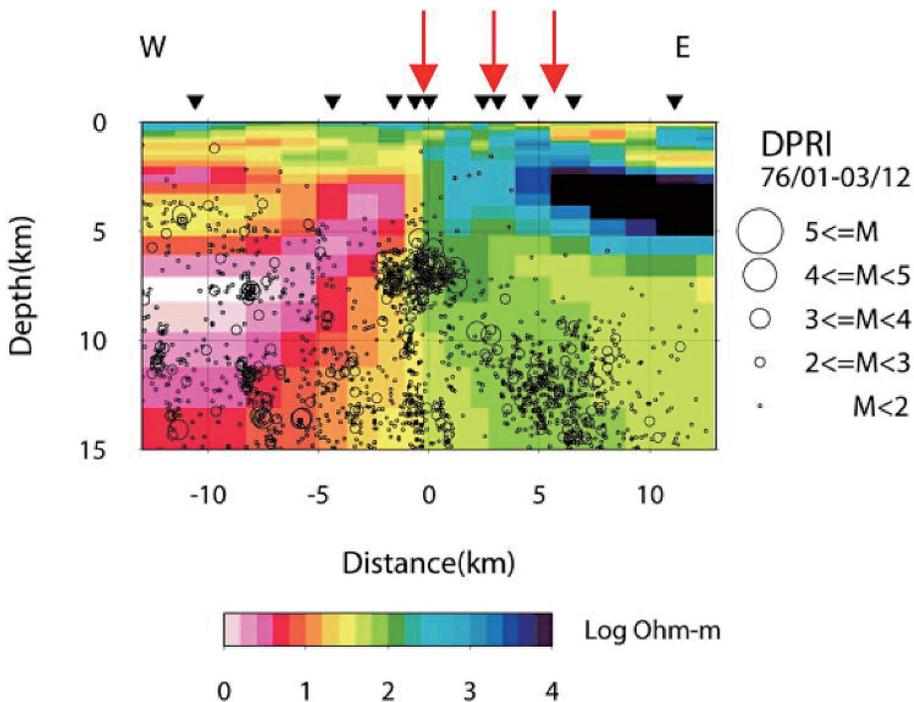


図3-6 吉村ほか (2005) による比抵抗構造の断面図(花折断層中部を東西に横切る測線)。

3.3.5 重力異常

琵琶湖周辺は顕著な負の重力異常を示す地域である。その一因は、琵琶湖底の堆積層の低密度によるものであるが、西側に向けて深くなる琵琶湖の基盤層は最大でも1 kmほどの深度にすぎない。負の重力異常は、琵琶湖西岸から丹波山地にかけての広い地域に及んでおり、琵琶湖の堆積層だけでこれらの異常を説明することはできない。丹波側と近江側でモホ面の深度に段差をつけたり、西に向けて急激に傾き下がるフィリピン海プレートを設定するなど、深部を含めた大規模な構造を仮定しないと、観測される長波長の重力異常を説明することは難しい。

3.4 丹波／琵琶湖西岸両地域の対照的な特徴

上述のように、北摂・丹波地域と琵琶湖西岸両地域は多くの対照的な特徴を示すことがわかる。これらの特徴を分かち線は、共通して花折断層もしくは琵琶湖西岸断層あたりに引けると考えられる。これらの特徴の違いは地殻内の流体分布の違いによる可能性が高く、総じて丹波側ではS波反射面の存在や低い比抵抗など地殻全体にわたって流体の存在が強く示唆される。鳥弧においては沈み込むスラブが脱水し、上昇した流体が地殻内の地震活動を左右すると考えられている。丹波直下ではフィリピン海プレートは深さ数十 km に達しているらしいことがレシーバファンクション解析により示されたが、近江盆地側ではほぼモホ面に接するほどの浅い位置にあることが示唆される。このプレート深度の違いが流体発生状況の違い

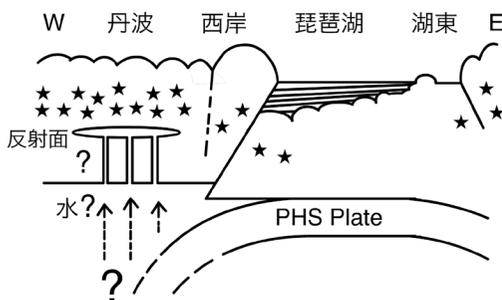


図3-7 『丹波』から『琵琶湖』に至る模式的な東西断面。

いとなり、ひいてはその直上における地震活動の差異をもたらしている可能性がある [Fig. 3-7]。また、近江盆地の下の浅いプレートはその上の地殻に対して力学的にも影響を与えているかもしれない。いずれにせよ、琵琶湖西岸・花折断層系は、単に顕著な活断層帯であるにとどまらず、深部の大規模構造を背景とした列島規模の主要なテクトニック境界であると言えよう。

参考文献

- 青木裕見・片尾 浩・飯尾能久・三浦 勉・中尾愛子・米田 格・澤田麻沙代・中尾節郎 (2012)：稠密地震観測による近畿地方北部におけるメカニズム解と応力場, 京都大学防災研究所年報, 55, B, pp.121-140.
- 飯尾能久 (2010)：内陸地震の発生過程の解明, 自然災害科学, J. JSNDS, 28-4, pp. 284-298.
- 海谷絵未・片尾 浩・澁谷拓郎・飯尾能久・三浦 勉 (2014)：稠密地震観測に基づく近畿地方北部における地震は速度構造, 京都大学防災研究所年報, 57, B, 85-93.
- 片尾 浩 (1994)：近畿地方微小地震活動域直下に存在する顕著な地殻内反射面, 地球惑星科学関連学会1994年合同大会予稿集, E12-05.
- 片尾 浩 (2002)：丹波山地の地震活動, 月刊地球, 号外38, pp. 42-49.
- 片尾 浩 (2005)：陸の上の水っぱい話 - 特に近畿地方内陸部における深部流体について -, 月刊地球, No. 51, 286-292.
- 片尾 浩・伊藤 潔・中尾節郎・廣瀬一聖・西村和浩・福島麻沙代 (2007)：丹波山地直下の地殻深部反射面の探査 - 大大特による人工・自然地震観測 -, 京都大学防災研究所年報, 50, B, pp. 297-302.
- 佐々木裕樹 (2011)：近畿地方北部の微小地震活動域直下の地殻構造の推定 - S波反射法とレシーバ関数解析による -, 京都大学理学研究科修士論文.
- 大都市大震災軽減化特別プロジェクト (2007a)：平成18年度成果報告書, 3.1.3 近畿地殻構造探査 (近江測線).
- 大都市大震災軽減化特別プロジェクト (2007a)：平成18年度成果報告書, 3.4.2.1 活断層の深部形状モデルに関する研究.
- 藤野宏興・片尾 浩 (2009)：琵琶湖西岸地域に置ける微小地震のメカニズム解と応力場, 京都大学

- 防災研究所年報, 52, B, 275-284.
- 三浦 勉・飯尾能久・片尾 浩・中尾節郎・米田格・藤田安良・近藤和男・西村和浩・澤田麻沙代・多田光弘・平野憲雄・山崎友也・富阪和秀・辰己賢一・加茂正人・澁谷拓郎・大見士郎・加納靖之 (2010): 近畿地方中北部における臨時地震観測, 京都大学防災研究所年報, 53, B, pp. 203-212.
- 吉村令慧・宇都智史・大志万直人 (2005): 花折・琵琶湖西岸断層系周辺の電気比抵抗構造, 京都大学防災研究所年報, 48, B, pp. 143-148.
- Aoki S., Y. Iio, H. Katao, T. Miura, I. Yoneda and M. Sawada, (2016): Three-dimensional distribution of S wave reflectors in the northern Kinki district, southwestern Japan, Earth Planets Space, 68:107, DOI 10.1186/s40623-016-468-3.
- Sagiya, T., S. Miyazaki and T. Tada (2000): Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan, Pure Appl. Geophys., 157, 2303-2322.
- Terakawa, T., Matsu'ura, M. (2010): The 3-D tectonic stress fields in and around Japan inverted from centroid moment tensor data of seismic events. Tectonics 29, TC6008. <http://dx.doi.org/10.1029/2009TC002626>.

4. 活断層と琵琶湖疏水

岡田篤正⁵

本章では琵琶湖疏水に関連して、活断層(活構造)や断層運動及び地殻運動に関わる問題について取り扱う。

琵琶湖西岸断層帯(図4-1)や並走ないし斜交する活断層群が活動した場合、琵琶湖疏水に大きな影響が生じるが、次の2事例が特に重要と考えられる。1)は活断層のずれや震動で用水路が寸断されたり崩壊したりすること, 2)は琵琶湖北部で沈降が生じると、湖水の移動や湖水位の低下が一時的にでも発生することである。

1)の活断層のずれに関しては、琵琶湖疏水は4本の活断層(帯)を横切る。活断層の詳細な位置は岡田ほか(1996a, 1996b)や岡田・東郷編(2000)、池田ほか(2002)、中田・今泉編(2002)

などに図示されている。琵琶湖に近い側から京都盆地側へと、疏水は1比叡断層南部を横切る(図4-1・2・3)。さらに、山科盆地の北東部では、2小関越断層を斜交する(図4-2・3)。山科盆地の北西部では、3花山-勸修寺断層北端部を横切る(図4-2・3)。そして京都盆地の東縁では、4銀閣寺-南禅寺(鹿ヶ谷)断層南端部を横断する(図4-2・4)。これら活断層沿いでは、地震を起こして活動した際に断層面の急激なずれが生じる可能性がある。また、震動を受けて断層破碎帯付近が損傷や崩壊を被ることも予想される。個々の活断層について、以下に概略的な性質について述べる。

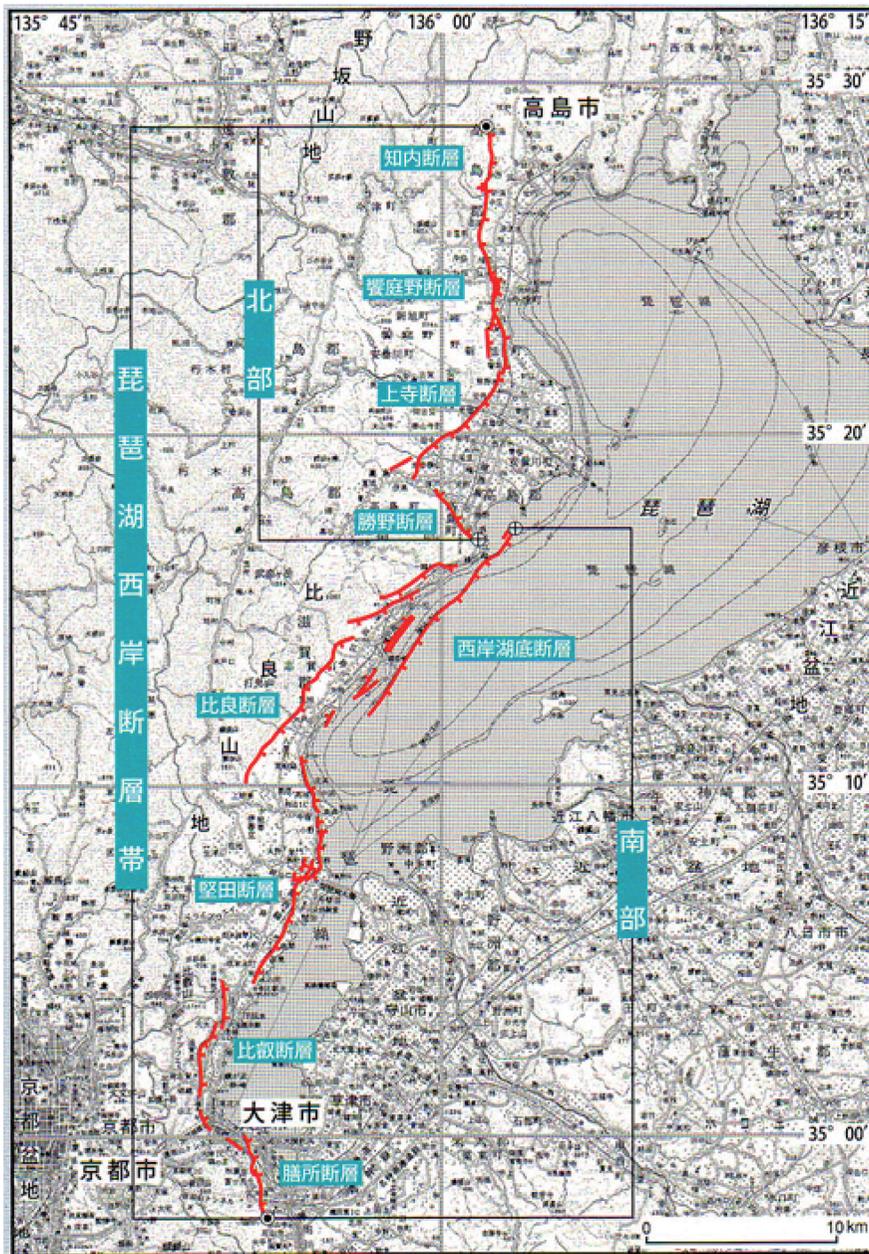
4.1 比叡断層を含む琵琶湖西岸断層帯

日本最大の内陸湖である琵琶湖が現在の位置(近畿地方北部)に発現してきたのは約100万年前頃からとされる。この湖は北側への沈降や西側への傾動を受けながら、湖盆の形成が第四紀後期にも継続してきた。一方、西側には武奈ヶ岳から比叡山へと延びる急峻な比良-比叡山地が連なり、さらに西方へ広がる丹波高地が展開する。こうした近江盆地と丹波高地との大きな地形境界に沿って、琵琶湖西岸断層帯が北北東-南南西方向に約59 km 延びる(図4-1)。この断層帯に属する活断層の詳細位置は、1:25,000都市圏活断層図「熊川」「北小松」「京都東部」「京都東南部」で示されている。いずれの場所でも断層線はかなり出入りに富み屈曲している。断層線近くの古琵琶湖層群は急傾斜し、明瞭な変位地形が連続的に発達している。断層露頭やトレンチ調査でも西側から東側へ衝き上げる逆断層が観察されている。当断層帯の長期評価は地震本部(2009)により一部改定されたが、以下に述べるように要約される。

この断層帯全体は滋賀県高島市(旧マキノ町)から大津市国分付近へとほぼ南北方向に延びる。位置・形状・過去の活動時期等が近江高島付近を境に北部と南部で大きく異なる(図4-1)。

北部は長さ約23 km であり、西側から東側へ衝き上げる逆断層とされる。比較的精度の良い活動履歴が饗庭野断層での2ヶ所のトレンチ調査で判明した。最新活動時期は約2800年前以後で約

⁵ 立命館大学



琵琶湖西岸断層帯の位置図

●は断層帯の北端と南端
 ⊕は北部の南端と南部の北端
 (基図は国土地理院発行数値地図
 200000「岐阜」「名古屋」「宮津」
 「京都及大阪」を使用)

◎印は断層帯の北端と南端。

図4-1 琵琶湖西岸断層帯の位置図(地震調査研究推進本部事務局, 2009)

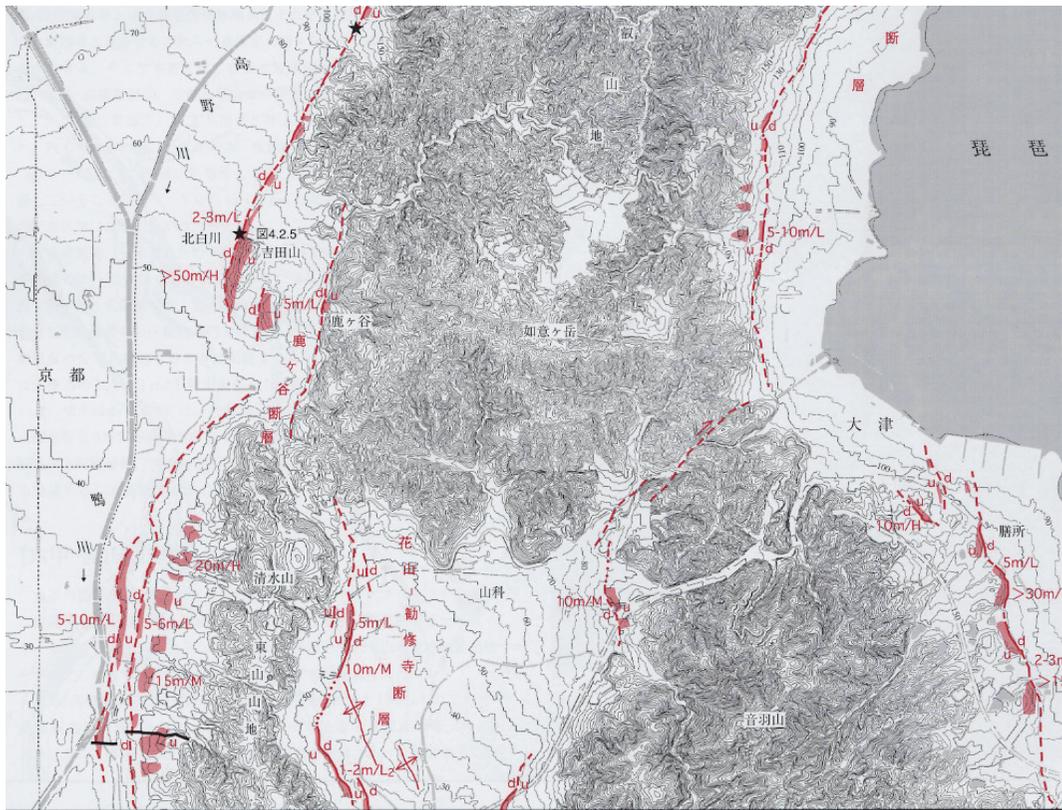


図4-2 琵琶湖疏水付近の活断層分布図(池田ほか, 2002)

2400年前以前であり、この時に西側が東側に対して相対的に2-5 m 隆起した。平均的な上下方向の変位速度は約1.8-2.1 m / 千年で、平均活動間隔は約1000-2800年と見積もられる(小松原ほか, 1999; 地震本部, 2009)。

南部は比良-比叡山地の東麓とそのさらに東側を並走する活断層群である。高島市南方から大津市国分付近に至るが、比良・西岸湖底・堅田・比叡・膳所の各断層が配列し、長さは約38 km に達する。大津市本堅田地区の堅田断層を横切って数多くのジオスラサーとボーリング調査が実施され、11世紀中期から13世紀中期の間に約6 m に及ぶ上下変位が生じたことが判明した(Kaneda et al, 2008)。この時代に湖西や京都に大きな被害を与えた地震は1185(元暦2)年京都近江地震(以降1185年地震と略記)しかないため、これが堅田断層の最新活動とみなされる。この活動時に西側

が東側に対して相対的に撓み上がる撓曲運動が生じ、地下では逆断層の動きが起こったと推定される。上下方向の平均変位速度は約1.4 m / 千年であり、平均活動間隔は約4500-6000年程度と見積もられる。中山忠親の日記「山塊記」には1185年地震時に「琵琶湖の湖水が北に流れて湖畔が幅数十 m 干上がったが、後日水位は元に戻った」と記録されている。こうした記載と被害を受けた建造物の分布状況から、西山(2000)はこの地震の震央を琵琶湖西岸付近と推定し、堅田断層に起因すると示唆した。

この断層帯から発生する将来の大地震は、過去の活動と同様に北部と南部で分かれて活動する場合には、北部はM7.1程度であり、地震発生確率は今後30年以内で1-3%とされる。一方、南部はM7.5程度で、1185年に大きく活動したことから、長期的な発生確率は今後300年以内でもほぼ0%

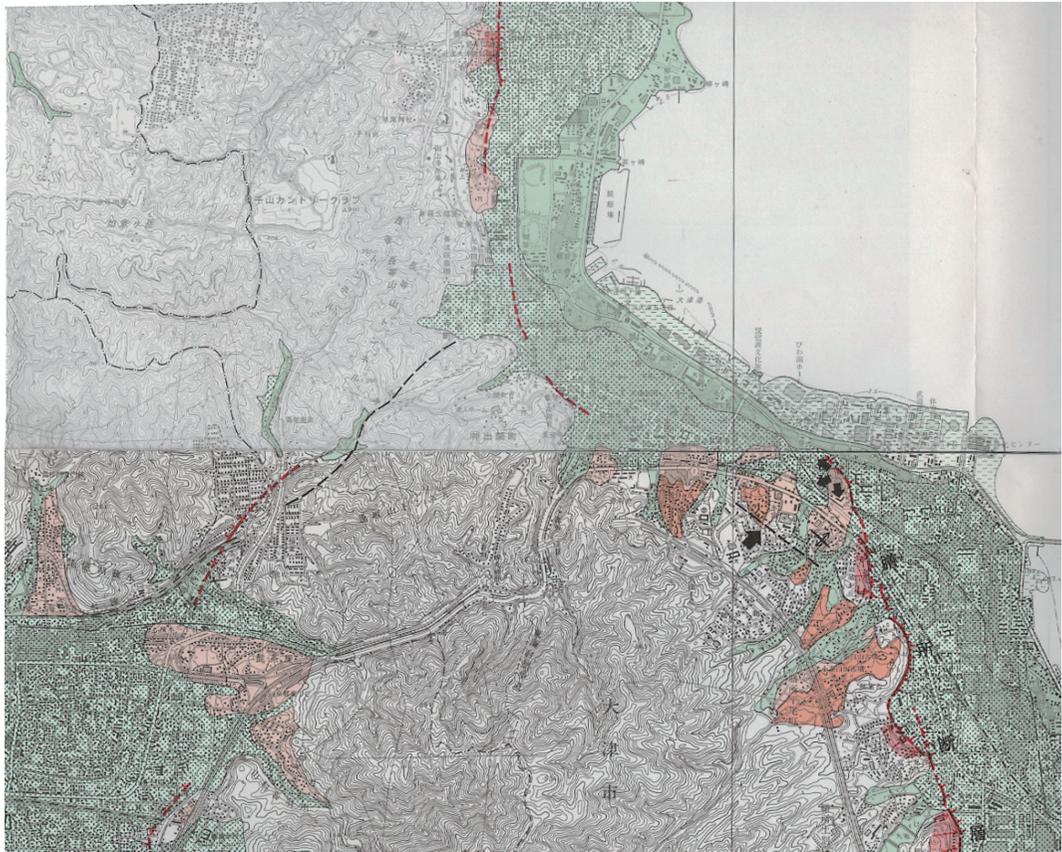


図4-3 1:25,000都市圏活断層図「京都東北部」「京都東南部」の一部(岡田ほか, 1996a, 1996b)

と低い。なお、断層帯全体が同時に活動する可能性も指摘され、その場合にはM7.8程度の地震が発生する。しかし、その確率は南部が単独で活動する場合の確率を超えないものと考えられている。

4.2 小関越断層

東海道本線逢坂山トンネルの北側にある小関越(大津市園城寺町-藤尾奥町境)から茶戸町を経て京都市山科区四ノ宮に至る、北東-南西方向の活断層が推定される。この推定活断層は文献により様々に表現されており、明瞭な変位地形には欠けるが、疏水の通過位置と大津市稲葉台西部付近で斜交している(図4-2・3)。岡田ほか(1996)では長さ約2.5 kmの区間に、位置やや不明確の活断層及び推定活断層として示している。池田ほか

(2002)でも右横ずれを伴った、断層位置が不確かな活断層を長さ約3.5 kmの区間で図示している。この活断層については詳しい調査が実施されていないので、活動間隔や変位速度・性質などの詳細は未解明である。断層走向からみて右横ずれを伴った高角度断層であり、北西側が相対的に低下する上下変位をもつ活断層の可能性が高い。活動度はB-C級であり、西岸断層帯から派出するような配置をしている。

4.3 花山-勸修寺断層北端部

山科盆地の西縁、花山丘陵東縁の山麓線沿いには花山-勸修寺断層が南北方向に分布している。雁行状に配列する数本の断層から構成され、逆断層帯が形成されている。新旧の段丘面が撓曲状の

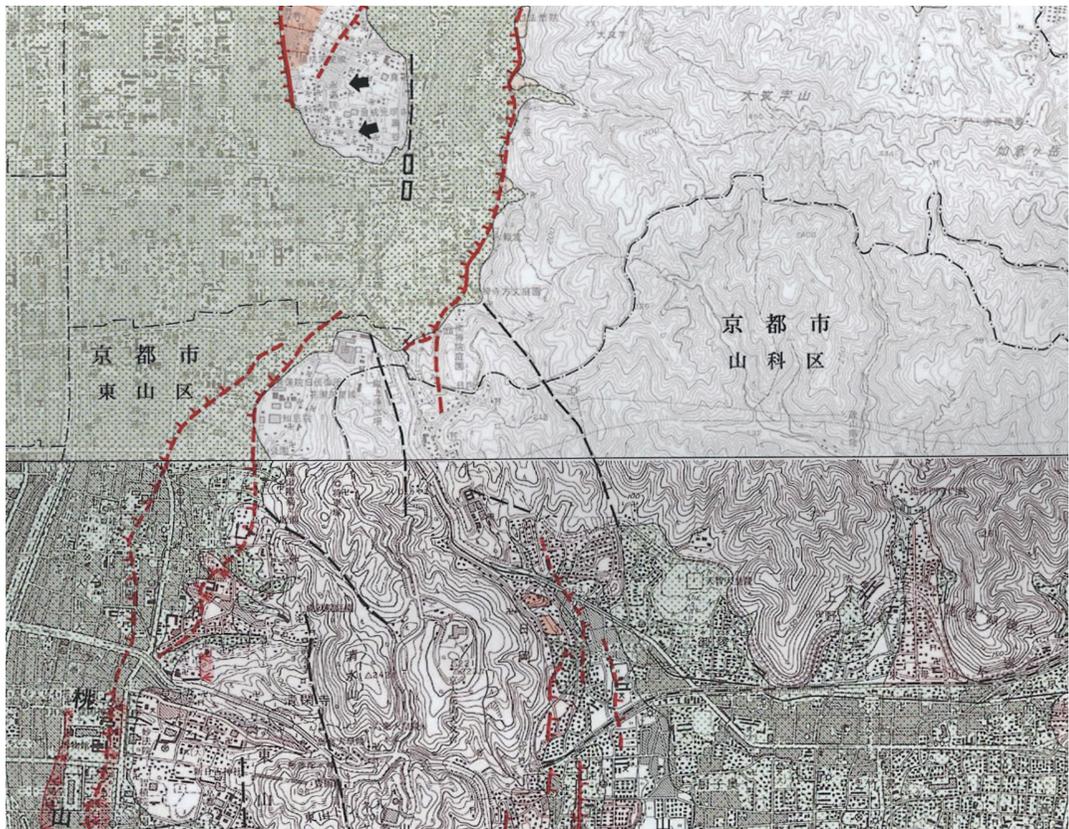


図4-4 1:25,000都市圏活断層図「京都東北部」「京都東南部」の一部 (岡田ほか, 1996a, 1996b)

変位を受けている。盆地中央西部の上花山・川田・西野山・栗栖野などには、低位段丘面がナマコ状に膨れあがり、背斜状に変形した地形が配列している。この断層帯の北端部を疏水は横切るが、詳細な位置関係は明らかにされていない。また、断層(破碎帯)の性質や断層の性状についても詳しい調査は実施されていないようである。地震本部(2003)による三方・花折断層帯の長期評価では、この断層は銀閣寺-南禅寺(鹿ヶ谷)断層と共に花折断層帯の南部に属するとしている。

4.4 銀閣寺-南禅寺(鹿ヶ谷)断層南端部

京都盆地の東側にある大文字山は西側に急傾斜の断層崖を伴い、その山麓線沿いには南北走向の活断層が長さ約3kmの区間で認められる。岡田・東郷編(2000)では銀閣寺-南禅寺断層、吉岡ほ

か(2000)や池田ほか(2002)では鹿ヶ谷断層とよんでいる。鹿ヶ谷付近では低位段丘面(約2万年前の形成)が比高約5mの低断層崖で切断されている。有名な大寺院が山麓部に配列し、かなりの人工改変を受けているので、この断層の南端部を疏水は横切るが、断層の活動時期や間隔などの詳しい性質は判明していない。なお、地震本部(2003)の三方・花折断層帯の長期評価では、この断層は花折断層帯の南部に属するとしている。

4.5 琵琶湖疏水の工事と土砂崩壊

琵琶湖疏水(第1トンネル)の掘削工事中に、次のような土砂崩壊事故の報告がある。「明治二十一年十月五月午後第十時三十分第一隧道大津口零點ヨリ五拾壹尺ノ奥ニ於テ俄然土砂墜落シ上部ノ道路へ長四拾貳尺幅三拾六尺深サ拾八尺ノ窪

ミラ生シタル為メニ隧道内部ニ閉籠メラレタル坑夫及車夫等・・・」との記録がある。この事故や他の事例についても詳細を把握や追跡をしていないので、詳しい原因や経緯は判らない。しかし、何本もの断層破砕帯や風化した基盤岩石類を疏水は横切るので、掘削工事は困難を伴い、落盤事故なども発生したことと思われる。当時としては、断層破砕帯の一部には急激なずれ変位が生じる可能性は想定されていなかったと考えられる。しかし、琵琶湖疏水の防災対策を検討するためには、これら断層破砕帯の詳しい位置やずれの向き等の断層の性質を把握しておくことは重要である。

4.6 地震本部による活断層の長期評価の問題点

堅田断層は湖西丘陵の東縁を画する長さ約13 kmの活断層であり、そのほぼ中央部でジオスライサー・ボーリング調査が行われた。その主要な成果である最新活動時期・活動間隔・変位量などは、琵琶湖西岸断層帯南部ではこの1ヶ所だけの調査結果に基づいている。この南側に配置する比叡断層は長さ約8 kmであり、中位・低位段丘面、さらに沖積面に変位を与え、西側隆起・東側低下の低断層崖-撓曲崖が認められる。堅田断層中部では最新活動時の上下変位量が6 mに及ぶほど大きな変位であったので、堅田断層だけでなく比叡断層や膳所断層(5 km)も活動したと推定された。しかし、北方に位置する西岸湖底断層帯や南方に位置する膳所断層等が最新活動時にはほぼ同時に活動したかどうかの具体的なデータは得られていない。

小松原(2012)は1185年元暦地震を起こした起震断層について再検討し、次に述べるような見解をまとめている。1)比良断層については地学的な証拠から元暦地震時に活動した可能性が高い。2)堅田断層は地学的・考古学的な資料から元暦地震の震源断層である確実度が高い。3)比叡断層は被害状況から元暦地震の起震断層ないしその近傍に位置すると考えられるが、地学・考古学的な証拠を欠く。4)膳所断層は文献資料からも地学的資料からも元暦地震の起震断層であるとは考えがたい。

これらの見解は琵琶湖西岸断層帯南部が一括して動くとして捉えている地震本部(2009)の解釈とは異なる。この断層帯は逆断層であり、断層線が屈曲し、断層毎に異なる変位速度や活動間隔等をもつ可能性が高いため、個々の活断層について活動履歴や変位量の累積性を解明する必要がある。

ところで、疏水取入れ口のある天津市三保ヶ崎付近では、比叡断層の変位地形や位置はきわめて不明瞭となる(図4-2・3)。この付近では比叡断層は沖積扇状地の上位置し、しかも市街地化が進行しているので、最新活動時期やその変位量の算定はきわめて難しい状況にある。しかしながら、琵琶湖疏水の維持や安全対策の上では活断層調査は重要な項目であることを銘記すべきである。

さらに南側に位置する膳所断層(長さ約5 km)は天津市街地南部の西側山麓を南北走する(図4-3)が、沖積面や低位段丘Ⅱ面に変位地形が認められない。また、1185年地震時に大きな被害が断層近傍で生じていないので、この時に活動していない可能性が高い(小松原, 2012; 小松原・岡田, 2012)。したがって、膳所断層の詳しい調査はきわめて重要であると言える。

地震本部(2009)による長期評価(一部改訂)が公表されているが、琵琶湖西岸断層帯南部は今後30年の地震発生確率がほぼ0%という内容は比良断層や堅田断層については該当するとみなされるものの、比叡断層南部や膳所断層については1185年地震で活動した証拠はまだ得られていないので、長期評価は言及できない段階といえる。

4.7 津波・湖水位の変化-移動

地震本部(2009)によると、琵琶湖西岸断層帯北部全体は長さ約23 kmであり、平均上下変位速度は約1.8-2.1 m/千年、最新活動時期は約2800年前以後で約2400年前以前、活動時には断層の西側が東側に対して2-5 m程度で隆起し、平均活動間隔は約1000-2800年と評価した。そして、北部全体が1つの区間として活動する場合、M7.1程度の地震を発生して、2-5 m程度の段差や撓みが生じる可能性があるとしている。その発生確率は今後30年以内で1-3%とみなし、我が国の主な活

断層の中では高いグループに属すると公表した。

このような地震が発生した場合には、琵琶湖北部は西側への傾動を伴って沈降する(植村・太井子, 1990)。琵琶湖の最大水深(-103.58 m)部は安曇川河口沖にあり、滋賀県の子測でも地震発生時には長浜市沿岸に3 mの津波が到達している。1185年(元暦2年)地震の時に「琵琶湖の水が北へ流れ、湖岸が干上がった」という『山槐記』の記録については前述した。また、湖北の長浜市塩津浜にある塩津港遺跡で近年に行われた発掘調査の際に、ご神体と共に神社遺構が発見され、柱は全て琵琶湖の沖と反対方向に傾いていた。急激な水位上昇が発生し、最重要のご神体を移すことなく埋没しているため、これは平安時代後期に琵琶湖で発生した津波による埋積とみなされている(滋賀県教育委員会, 2012)。1185年地震時の地殻変動に誘発された津波が琵琶湖北岸にまで到達したものであろうか。

琵琶湖西岸断層帯の北部が活動した場合には、西側の山地・丘陵・台地が隆起するが、東側の琵琶湖や湖岸域は沈降する。その上下変動量は2-5 m程度と推定されている。湖底が急激に沈降した場合には津波を誘発する。また、この発生に伴われて南部の湖水は北に流れて湖岸域は一時的に干上がり、琵琶湖疏水の取り入れが不能となる。元の水位に戻るには発生時期や変動量によってかなり異なるので、様々な条件での検討を要する。こうした事態が発生する確率は地震本部(2009)によると、前述のように今後30年以内で1-3%と大きな値であり、対策・対応が必要である。

一方、地震本部(2009)の評価によれば、琵琶湖西岸断層帯南部では全体38 kmが1つの区間として活動する場合、M7.5の地震が発生し、上下方向の運動量は6-8 mに達する。その場合、4.9 mの津波が沖島に到達すると予想される。琵琶湖西岸断層帯の南部全体が1185年地震で活動しているとみなし、今後300年以内に地震が起こる確率はほぼ0%としている。比良断層(あるいは西岸湖底断層)・堅田断層・比叡断層北部はこれに該当するとみなされる。しかしながら、比叡断層南部や膳所断層は地学的な観点や資料不足によ

り、琵琶湖西岸断層帯南部の対象断層から除かれるべきと思われる。琵琶湖疏水の取り入れ口にあたる大津市三保ヶ崎付近は比叡断層南部の変位地形が不明瞭な場所であり、詳しい調査が必要であらう。

引用文献

- 池田安隆・今泉俊文・東郷正美・平川一臣・宮内崇裕・佐藤比呂志(2002): 第四紀逆断層アトラス. 東京大学出版会, 254p.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2003): 三方・花折断層帯の長期評価. 地震調査研究推進本部HP.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会(2009): 琵琶湖西岸断層帯の長期評価(一部改訂). 地震調査研究推進本部HP.
- 地震調査研究推進本部事務局(2009): 琵琶湖西岸断層帯の評価の一部改訂. 地震本部ニュース, 12, 4-5.
- Kaneda, H., H. Kinoshita and T. Komatsubara (2008): 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, doi:10.1029/2007B005300, 2008.
- 小松原琢(2012): 元暦二年(1185)近江山城地震の起震断層の再検討. *歴史地震*, 27, 1-7.
- 小松原琢ほか12名(1999): 琵琶湖西岸活断層系北部・饗庭野断層の活動履歴. *地震II*, 51, 379-394.
- 小松原琢・岡田篤正(2012): 巡検「比良山地周辺の活断層と歴史地震」案内書. 日本活断層学会, 37p.
- 中田 高・今泉俊文編(2002): 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, DVD-2枚・60p. 付図1葉.
- 西山昭仁(2000): 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*, 16, 163-184.
- 岡田篤正・東郷正美・中田 高・植村善博・渡辺満久(1996a): 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-No.333.
- 岡田篤正・東郷正美・中田 高・植村善博・渡辺満久(1996b): 1:25,000都市圏活断層図「京都東南部」. 国土地理院技術資料, D-1-No.333.
- 岡田篤正・東郷正美編(2000): 近畿の活断層. 東京大学出版会, 408p.

滋賀県教育委員会 (2012) : 発掘調査からみる湖国の地震と人々の暮らしー県内25か所にのぼる地震跡から読み取る警鐘と知恵ー。あの遺跡は今14, 16-26.

植村善博・太井子宏和 (1990) : 琵琶湖湖底の活構造と湖盆の変遷. 地理学評論, 63, 722-740.

吉岡敏和・長 秋雄・木村克己・中江 訓 (2000) : 2.5万分の1花折断層ストリップマップ説明書. 構造図 (13), 地質調査所, 35p.

5. 大規模数値解析による地殻変動シミュレーション

市村 強⁶・山口拓真⁶・縣亮一郎⁶・藤田航平⁷・堀 高峰⁸

琵琶湖疏水周辺で大地震が発生した場合、断層運動によって生じる地殻変動によって大きな被害が引き起こされると懸念されている。このような地殻変動による被害の軽減には、地殻変動想定信頼性を高めることが重要な役割を果たすと考えられる。本稿では、これを目的として開発が進められている、大規模数値解析による地殻変動シミュレーションを概説する。

5.1 はじめに

観測技術の進歩により地殻変動観測データが充実してきている。日本列島陸域では空間分解能約20 kmでGPS観測網が整備されており、時刻歴の地殻変動が捉えられている¹⁾。このような各種観測データを統合することにより大領域で高分解能な地殻構造モデルが構築されてきている(以下、観測データに基づく高分解能な地殻構造モデルを高詳細地殻モデルと呼ぶこととする)。例えば、日本列島スケールでプレート形状が推定されている例²⁾、東北地方・南海地方の速度構造が細かいところでは分解能1 km程度で整備されている例³⁾等がある。観測網充実及び解析手法高度化が進められているため、より多くの地域でこのような大規模な高詳細地殻モデルの構築が進むと期待

されている。

被害想定だけでなく、地震発生等のメカニズムの理解等においても、地殻変動シミュレーションの果たす役割は大きいことから、多数の研究がなされてきた。地殻の半無限性を仮定した解析解ベースの解析に留まらず^{4,5)}、空間分解能は低いものの三次元有限要素法による解析も試みられつつある。地殻の不均質性や地表面・境界幾何形状は解析結果に大きな影響を及ぼすことが指摘されており⁶⁾、三次元有限要素法を用いることで複雑な地殻構造を考慮した計算が実現可能となる。

高詳細地殻モデルを用いた地殻変動シミュレーションを三次元有限要素法により行い、地殻変動観測データと連成すれば、地殻変動想定信頼性を高めることが出来ると期待される。しかしながら、解析対象領域が $10^{2-4} \times 10^{2-4} \times 10^{2-3}$ kmと大きく、シミュレーション結果の品質保証ができる十分な細かさの離散化を行うと、 10^8-10 程度の自由度の大規模問題となってしまふ。このような大規模問題では、有限要素法モデルの構築コスト及びそれを用いた有限要素解析の解析コストが膨大となり、解析実行が困難となるため、このような地殻変動シミュレーションは従来行われてこなかった。

5.2 地殻変動の大規模シミュレーション

この状況を打開するために、大規模数値解析を利用した三次元有限要素法による地殻変動シミュレーションが開発されている。背景格子を利用することで非構造四面体要素による高詳細地殻モデルの三次元有限要素モデルをロバストに自動生成するとともに、解空間と演算空間の疎密を効率的に利用した京コンピュータ用アルゴリズムを用いることによって大規模三次元有限要素解析が可能となっている。この手法により、京コンピュータ全系(82944計算ノード×8CPUコア/計算ノード=663552 CPUコア)を用いた663552超並列計算により、2兆自由度の地殻変動計算が可能となった⁷⁾。また、日本列島スケールの巨大高詳細地殻モデルを用いた東北地震後の日本列島の粘弾性地殻変動の解析も行われた⁸⁾。

⁶ 東京大学地震研究所

⁷ 理化学研究所計算科学研究機構

⁸ 海洋研究開発機構

この手法を GPU 環境に移植することで、小規模計算機環境でも、大規模問題を高速に解析できるようにした例を示す⁹⁾。この例では、琵琶湖西岸断層帯を対象とした地表面変位応答評価のための基礎検討がなされている。図5-1に解析に用いられた高詳細三次元地殻有限要素モデルを示す。モデル化範囲は、琵琶湖西岸断層帯を含む240 km × 240 km × 300 km の領域であり、J-SHIS¹⁰⁾の深層地盤データが用いられている。この地殻有限要素モデルに対して断層すべりを入力し、地殻変動計算を行うこととなるが、断層すべりは決定的に与えられるものではなく、曖昧さを含んでいる。曖昧さを定量的に扱うため、特定の断層帯位置に対して、マグニチュードが一定となるように断層すべり分布を確率的に変動させた10000通りの異なる断層すべりシナリオが設定された。そして、これらのすべての断層すべりシナリオに対して地表面変位応答が評価され、その平均と標準偏差によって、得られた応答の評価が行われている。図5-2に地表面での上下方向変位の平均値および標準偏差を示す。断層周辺地域は数十 km に渡って地盤の隆起が発生する可能性が示唆されている。また、断層すべりの曖昧さの影響を示す標

準偏差の大きさが場所によって異なっていることも示唆されており、地殻変動による被害予測にとって有用な知見を与えると期待される。

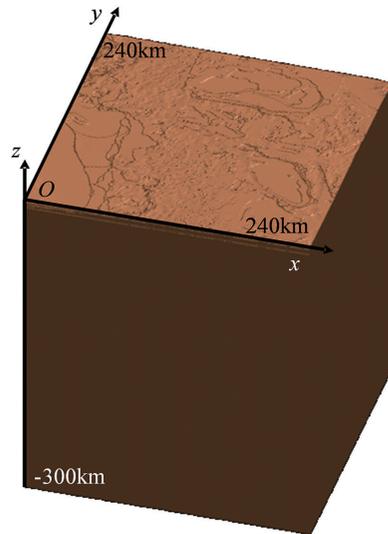


図5-1 琵琶湖西岸断層帯を含む高詳細三次元地殻有限要素モデルの一例（自由度は423,052,212）。

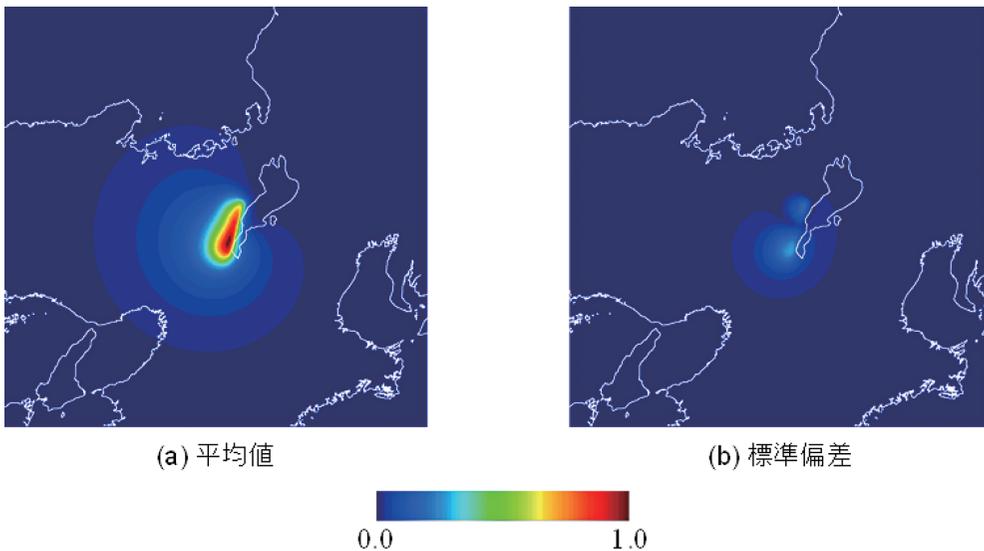


図5-2 高詳細三次元地殻モデルを用いた地殻変動シミュレーション結果の一例（上下変位分布図、平均変位の最大値を1.0と設定して正規化している）。

5.3 まとめ

地殻変動想定信頼性を高めるために、開発がすすめられている大規模数値解析による地殻変動シミュレーションを概説するとともに、琵琶湖西岸断層帯を対象とした基礎検討を紹介した。高性能計算技術により、従来は難しいとされてきた大規模地殻変動シミュレーションが可能となりつつある。また、入力となる断層すべりの曖昧さの考慮も可能となりつつある。一方で、地殻変動想定信頼性をより高めるためには、地殻構造モデルの物性や幾何形状の曖昧さをも考慮する必要がある。これを実現するためには、より高速な有限要素モデル生成手法及び解析手法が必要となるため、このような開発がすすめられることが期待されている。

参考文献

- 1) 国土地理院, GEONET: GNSS Earth Observation Network System.
- 2) Hashimoto, C., Fukui, K., Matsu'ura, M., 2004. 3-D Modelling of Plate Interfaces and Numerical Simulation of Long-term Crustal Deformation in and around Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 161(9-10), 2053-2068.
- 3) Koketsu, K., Miyake, H. Fujiwara, H. and Hashimoto T., 2008. Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, *Proc. 14th World Conf. Earthq. Eng., Paper No.S10-038*.
- 4) Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, 1135-1154.
- 5) Yukitoshi Fukahata and Mitsuhiro Matsu'ura, 2006. Quasi-static internal deformation due to a dislocation source in a multilayered elastic/viscoelastic half-space and an equivalence theorem, *Geophysical Journal International*, 166, 418-434.
- 6) Masterlark, T, 2003. Finite element model predictions of static deformation from dislocation sources in a subduction zone: Sensitivities to homogeneous, isotropic, Poisson-solid, and half-space assumptions, *Journal of Geophysical Research*, 108(B11), 2540.
- 7) Kohei Fujita, Tsuyoshi Ichimura, Kentaro Koyama, Masashi Horikoshi, Hikaru Inoue, Larry Meadows, Seizo Tanaka, Muneo Hori, Madgedara Lalith and Takane Hori, A Fast Implicit Solver with Low Memory Footprint and High Scalability for Comprehensive Earthquake Simulation System, *Research Poster for SC16: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis*, 2016.
- 8) T. Ichimura, R. Agata, T. Hori, K. Hirahara, C. Hashimoto, M. Hori, Y. Fukahata An Elastic/Viscoelastic Finite Element Analysis Method for Crustal Deformation using a 3D Island-scale High-fidelity Model, *Geophysical Journal International*, 206, 114-129, 2016.
- 9) 山口拓真・縣亮一郎・市村 強・堀 宗朗・Lalith Wijerathne. GPU クラスタを用いたモンテカルロ地殻変動想定手法の開発, 第36回地震工学研究発表会, 2016.
- 10) 地震ハザードステーション, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2017年1月23日 閲覧)

6. 琵琶湖疏水周辺で地震が発生した場合における京都市の水供給

野原大督⁹・堀 智晴⁹

大きな地震の発生時には、水道供給システムの要素である給配水施設や送水施設などが強い揺れや地盤変動によって損傷を受け、その結果として断水が発生する。京都市の水道は、原水の約97%を琵琶湖疏水によって運ばれる水に依存しており¹⁾、疏水の経路上に位置すると見られている琵琶湖西岸断層が活動した際には、大きな取水源を失う可能性がある。ここでは、地震時において水道システムが一般的にどのような影響を受けるのかについて述べた上で、京都市の水道供給システムに内在する地震時のリスクや、対策を考える上でのポイントについて考察する。

⁹ 京都大学防災研究所

6.1 地震による水道システムへの影響

一般的に、大きな地震が発生した際には震源域周辺の揺れの強かった地域を中心に水道施設の損傷が生じ、それに伴って断水が生じる。近年の大きな地震発生直後においても大規模な断水が発生しており、1995年兵庫県南部地震で最大で約1,300,000戸の断水が発生し、最長で90日間断水が継続したほか、2004年の新潟県中越地震(断水戸数:約130,000戸,最大断水日数:概ね1ヶ月)、2007年の新潟県中越沖地震(断水戸数:約59,000戸)、2011年の東北地方太平洋沖地震(断水戸数:約2,600,000戸,最大断水日数:津波被災地区を除き約5ヶ月)などでも、地震後に大規模かつ一部長期間の断水が発生している¹⁾。また、2016年の熊本地震においても、地震発生後に最大で約446,000戸の断水が発生している²⁾。こうした断水への対策としては、平時より施設や管路の耐震化を行うなど、そもそも断水が生じる危険性を減少させる取組みも重要であるが、ひとたび大規模な断水が発生した場合には、断水期間中の応急給水と、被災した水道施設の復旧による断水の早期解消が重要な視点となる。

まず、応急給水について述べる。断水が発生した場合の影響は、防火水槽や非常用の貯水タンクなどの整備により、断水時にでもある程度対応できる消防活動や医療活動を除いて、一般市民の日常生活への影響に限って考える場合でも、飲料水やトイレ、洗面・入浴、炊事、洗濯など、多岐に及ぶ。各用途への水道水の需要については、1995年兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)の際の行動を研究した事例^{3,4)}などがあり、飲料水が応急給水体制の整わない地震発生直後より必要とされるのを初めとして、地震発生から時間が経過すると、洗面、洗濯、入浴などへの水の使用のニーズが高まるのに伴って、要求を満足するために必要となる水の量も増えていくことが報告されている。

一般に、地震に伴う断水時にはただちに断水を解消することは困難であり、後述するように水道事業者の態勢が整い次第、被災した水道施設の応急復旧作業を順次行うため、各地区での水道施設による給水割合は徐々に増加するものの、断水解

消には時間を要する。そのため、断水が解消するまでの間は、給水車などによる応急給水が行われる。こうした応急給水計画は、事業者ごとに地域の事情なども勘案して計画することとなっているものの、阪神淡路大震災など過去の地震時の断水地区における被災者の取水量の実績や教訓などを踏まえた応急給水量の例が示されている⁵⁾。それによると、地震発生～発生後3日目までの応急給水量は3L/人・日、10日目までに20L/人・日、21日目までに100L/人・日、28日目までに被災前給水量(250L/人・日)となっている。これらの数字はあくまで目安であり、必ずしもこれに従う必要は無いが、地震発生後から日数が経過するにつれてより多くの水の使用に対する要求が高まる傾向を表している。給水量が多くなると、給水車や地区内の井戸水の利用だけでは対応が難しくなるとともに、給水を受ける住民が運搬できる水の量にも限界があることから、配水幹線・支線などからの仮設給水栓や仮配管からの給水が必要となり、それまでに水道施設の復旧作業が一定程度進むことが求められる。

一方、断水の解消、すなわち水道施設の復旧については、地震発生時に生じた断水は、被災した水道施設の復旧に伴い、一般に徐々に解消していくが、解消のプロセスや速度については、被災した水道施設の種類によって異なることが指摘されている⁶⁾。通常、管路の復旧では、周辺自治体からの応援の受入れも含め、水道事業者による復旧の態勢が整って以降、復旧作業に伴って徐々に通水可能区間が増え、断水率も徐々に減少する。しかし、浄水場や配水池、広域水道の送水管など、拠点施設が被災し機能を停止すると、拠点施設が復旧するまでの間は、その給水区域全体にわたって通水できなくなるため、断水が解消されず、断水率は高止まりする。通常、末端管路の復旧のためには、通水しながら漏水箇所の特定を行う作業が必要となるため、拠点施設の機能が回復しなければ、末端管路の復旧も進みにくい。そのため、拠点施設の復旧が遅れる場合や代替機能が無い場合には、そのことがボトルネックとなり、給水区域内の断水の解消はさらに後ろ倒しになることに

なる。

実際に、2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、拠点施設が被災し、バックアップ機能を十分に保持していなかったために、断水が長期化した事例が確認されている⁷⁾。例えば、宮城県宮城郡利府町などでは、主な取水源である仙南・仙塩広域水道の送水施設が被災し復旧に時間を要したことが影響し、断水率が地震発生後約20日間にわたって、ほとんど改善しなかったことが報告されている⁶⁾。また、2016年の熊本地震でも、水道の拠点施設の被災報告があった自治体において、断水率の高止まりが見られる。図6-1は、4月16日の本震発生後の経過日数と各自治体における断水の未復旧率との関係を示したグラフである。ここでは、未復旧率を各自治体の最大断水戸数に対する各日時点での断水継続戸数の割合(%)と定義している。最大断水戸数については厚生労働省の報告による数値を、断水戸数については熊本県災害対策本部発表の数値のほか、各自治体からの報道発表において断水戸数が判る場合にはそれらも採用している。地震の揺れによりほぼ全域で建物や施設の被害が大きかった益城町を除いて、未復旧率の低下が足踏みする時期がある阿蘇市や西原村、南阿蘇村では、その時期の熊本県災害対策本部や厚生労働省への報告において、送水施設や配水池の損傷など、水道拠点施設の損壊をうかがわせる記述があり、拠点施設の被災が断水解消へ及ぼす影響が見て取れる。

以上のように、地震によって特に水道拠点施設

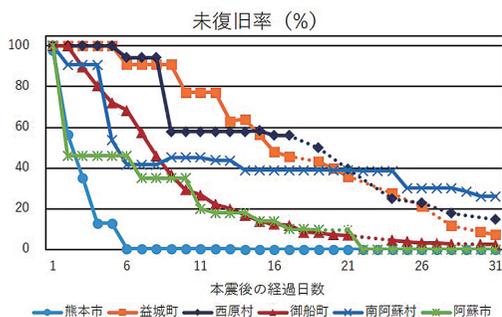


図6-1 2016年熊本地震における各自治体の断水の未復旧率（最大断水戸数に対する断水継続戸数の率）

に損害を生じた場合、給水区域における断水が長期化しやすいことが言える。給水区域各戸への通水が遅れ、地震が発生してから日数が経過し生活水の要求量が大きくなっていく時期に至っても広域的な断水が解消しない場合、前述のような応急給水計画を達成できない可能性がある。その意味で、水道拠点施設の機能が地震発生時においてもできる限り損なわれないような対策や応急復旧が、地震発生後の給水量の確保にとって特に重要であると考えられる。

6.2 地震時における京都市の水供給について

前述の通り、現状で京都市の水道の水源の大部分は、琵琶湖疏水によって琵琶湖から運ばれる水である。琵琶湖西岸断層帯南部が活動して地震が発生した場合には、京都市域においても最大震度6強～7の揺れが想定され⁸⁾、強い揺れによる水道管路等の損傷が考えられるほか、断層帯に跨るように位置する琵琶湖疏水も大きな損傷を受けることが懸念される。その場合、地震時の地盤変動により、断層帯を挟んで疏水の上流側の標高が下流側よりも低くなる危険性があり、現在のような自然流下方式での京都市域への送水ができなくなる可能性がある。そのため、京都市内の大部分の地区において断水が生じることが想定される上に、停止した琵琶湖疏水の機能を早期に回復できない場合、市内の広範囲において通水できない期間が長期化することが懸念される。また、復旧等により疏水の送水機能がある程度回復した場合でも、その後に初めて通水試験を伴う下流側の水道管路の点検が可能となることから、末端管路復旧に伴う給水区域の最終的な断水の解消はさらに遅れることになる。断水の解消が遅れ、地震発生後から日数が経過し生活水の要求量が増える時期においても広域的な断水が継続するようであれば、給水車等による応急給水だけでは増大する水へのニーズに対応することが困難になると考えられる。京都市でも、地震時の給水能力をできる限り確保できるよう、応急給水体制の整備や緊急遮断弁増設を含めた配水池貯水能力の増強、耐震性貯水槽の整備などに取り組んでいるが⁹⁾、これらに

よって維持することのできる給水能力には限界があり、取水の拠点施設である琵琶湖疏水の機能の喪失に伴って断水期間が長期化すれば、対応しきれないものと考えられる。生活水以外でも、例えば、医療機関における透析用途の水やごみ焼却施設における災害廃棄物の焼却時に必要な水などが確保できないなど、多様な影響が生じ、復興作業全体が遅れる可能性も懸念される。

このように、地震によって琵琶湖疏水の機能が阻害された場合、京都市域では広範囲にわたり断水が生じるとともに、断水が長期化する可能性が大きい。こうした影響を小さくするためには、疏水構造物を耐震化することで地震時の損壊を防ぐまたは軽減すること、次章で紹介されるロサンゼルス市の耐震対策のように、疏水構造物が破損した場合でも最低限の水量の疏通能力を持たせるような方法などが考えられる。一方で、水道水源の多様化を図り、琵琶湖疏水への原水の依存度を低下させることが、本質的には重要であろう。特に、京都市は豊富な地下水資源に恵まれているとされ、伝統産業やホテル、商業施設等を中心に、現在でも地下水が利用されている。こうした地下水取水設備を持つ市民や事業者と協定を結ぶなどして、災害時に水を融通できるようになれば、琵琶湖疏水の機能が喪失した際の強力なバックアップ機能となり得ると考えられる。実際、京都市においても、市民や事業者等が所有する井戸を「災害時協力井戸」として登録し、災害時に地域の生活用水として井戸水の提供を受ける制度がある¹⁰⁾。こうした制度を災害計画に組み込むなどうまく活用し、取水した地下水を災害時には浄水場や配水池等に導水・送水できるようにするなどして、地下水からの臨時的取水機能を確保できるようにすれば、平時に膨大なコストをかけることなく、地震を含む様々な要因で琵琶湖疏水の機能が損なわれた場合にもその取水機能を一時的にある程度補完し得るような、冗長性の高い水道システムを確立できると期待される。

参考文献

1) 厚生科学審議会生活環境水道部会水道事業の維

持・向上に関する専門委員会：資料1-1平成28年熊本地震における主な対応（水道関係）、第2回水道事業の維持・向上に関する専門委員会資料、2016。

- 2) 厚生労働省：熊本県熊本地方を震源とする地震について（第42報）、2016。
- 3) 川崎順子・長橋純男：地震時の上水道機能停止による生活支障の定量評価に関する研究－1995年兵庫県南部地震後の生活実態をもとにした事例研究－、日本建築学会構造系論文集、第503号、pp.45-52、1998。
- 4) 山田 淳・森田敦子・橋本将昭：震災復旧過程における水利用行動の実態危機管理の方策、環境システム研究、pp.575-579、1995。
- 5) 厚生労働省：水道の耐震化計画策定指針、p.12、2008。
- 6) 鎌田泰子・岡本 祐：東北地方太平洋沖地震における断水長期化要因の解明、地域安全学会集、No.17、pp.83-91、2012。
- 7) 厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書、p.3-37、2013。
- 8) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：琵琶湖西岸断層帯の評価（一部改訂）、37pp.、2009。
- 9) 京都市水道局：京都市水道マスタープラン－京都しんせい水道整備ビジョン－、31pp.、2001。
- 10) 京都市上下水道事業経営審議委員会：京都市の地下水利用の在り方等についての意見書、2016。

7. 琵琶湖疏水の耐震対策について～ロサンゼルス導水路の事例紹介と提案

飛田哲男¹⁰⁾

ここでは、アメリカ合衆国カリフォルニア州のロサンゼルス導水路のエリザベストンネル耐震計画の事例を紹介する。同トンネルは、ロサンゼルス市北方でサンアンドレアス断層を貫いて建設されており、共用年数や延長距離など琵琶湖第2疏水との類似点も多い。それに続き琵琶湖疏水の耐震補強法に関する提案と試算事例を紹介する。

¹⁰⁾ 関西大学

ロサンゼルス導水路の事例紹介

2014年に開催された「琵琶湖疏水の耐震性を考える－琵琶湖西岸断層帯が活動した場合の地殻変動と強震動の影響－」第4回研究会の講師であるロサンゼルス市水道局 (Los Angeles Department of Water and Power) の Craig Davis 博士より提供いただいた資料 (Davis and Hu, 2014) に基づき事例を紹介する。同水道局は人口390万人、面積1,204 km²に対し電力と上水を供給するアメリカ最大の公社である。その水需要は年間6億6千3百万立方メートルである。この需要を賄うためコロラド州、カリフォルニア州北部から3本の水路、すなわち疏水を引いており (図7-1)、その総延長は約

1,700 kmにおよぶ。そのうちロサンゼルス導水路 (Los Angeles aqueduct) は2本の導水路から成り、第1導水路の延長は375 km、第2導水路は220 kmである。第1導水路は、ロサンゼルス市の北方約70 kmに位置するエリザベストンネル内でサンアンドレアス断層を横切っている。その他にもサンアンドレアス断層を横切る導水路が存在するが、ここでは、一つの事例としてエリザベストンネルの断層変位対策について紹介する。

第1導水路は、1913年に完成した導水路であり (表7-1)、シエラネバダ山脈の東部に位置するモノ湖 (Mono Lake) から、自然流下により年間およそ3億7千万立方メートルの水をロサンゼルス



図7-1 南カリフォルニア地域の導水路網 (Sutherland, et al. 2014)

表7-1 エリザベストーンネルと第2琵琶疏水の諸元

	エリザベストーンネル	第2琵琶疏水
着工年	1907	1908
完工年	1911	1912
供用開始年	1913	1912
全長 (m)	8,190	7,400
内寸 (m)	3.3高さ×2.9幅	4.1高さ×3.9幅
流量 (m ³ /s)	19.5	15.3
流下方式	圧力	自然
形式	掘貫トンネル	掘貫トンネル/埋立水路(暗渠)

ス市に供給している。この第1導水路は、ロサンゼルス市の北方約80kmに位置するフェアモント貯水池 (Fairmont Reservoir) 付近から南下し、エリザベストーンネル内でサンアンドレアス断層と直交したあと、サンフェルナンド盆地の北方に位置するファン・ノーマン貯水池 (Van Norman Reservoir) に至る (図7-2)。1971年当時 Lower San Fernando Dam と呼ばれていた同貯水池は、同年のサンフェルナンド地震で、液状化により堤体が大きく崩壊したものの越水には至らなかった

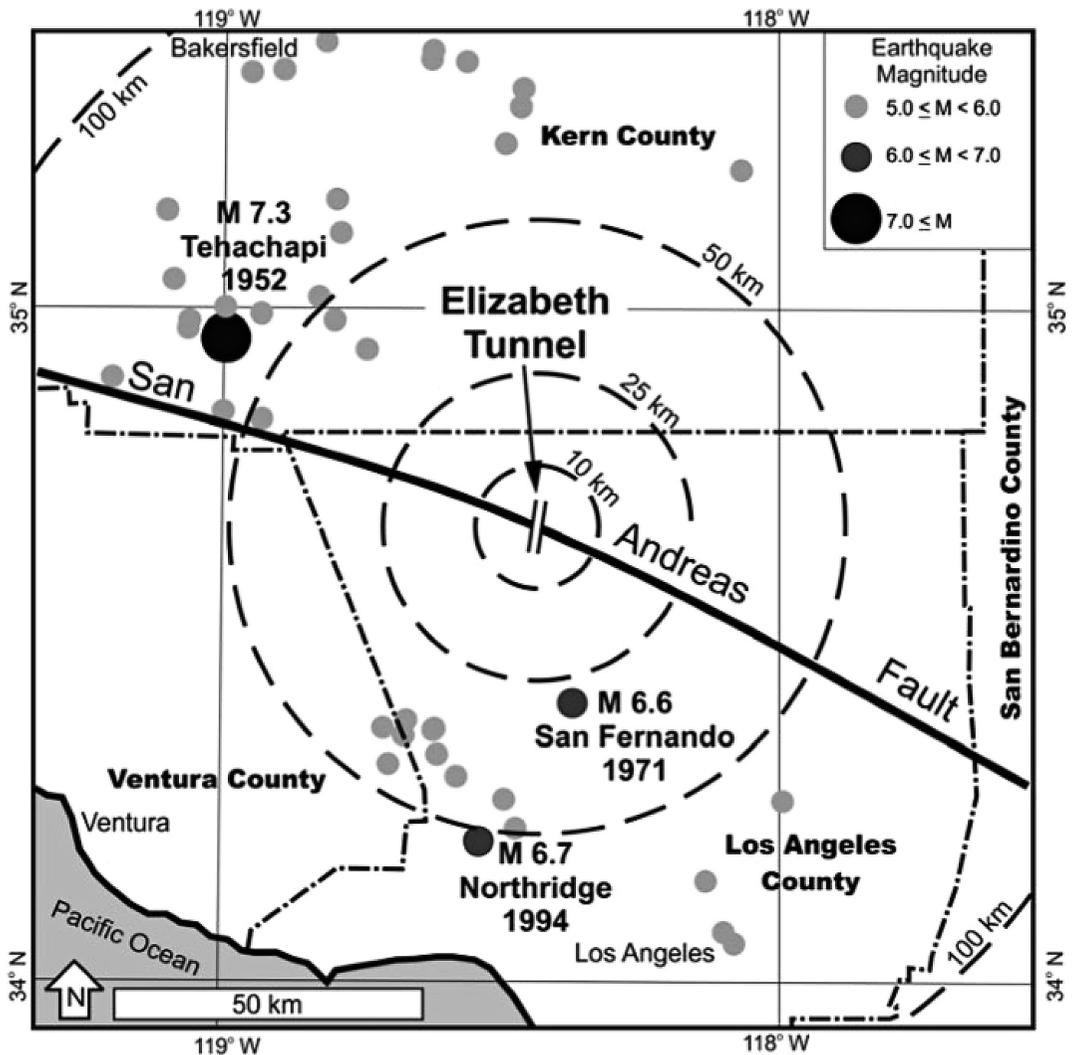


図7-2 エリザベストーンネル周辺の地震活動の履歴 (Sutherland, et al. 2014)

ことで広く知られている (Seed, et al. 1975)。エリザベストンネルの全長は8.2 km, 内径幅2.9 m, 内面にはコンクリートによるライニングが施されている。表7-1に示すように、第1導水路の供用開始年(1913年)は、第2琵琶湖疏水(同1912年)とほぼ等しく、その他にも全長も8km程度と類似点がある。

また、図7-2に示すように、エリザベストンネル周辺は、上で触れた1971年サンフェルナンド地震(M6.6)のほか、1994年のノースリッジ地震(M6.7)が発生しており、地震活動度は比較的高い地域であるといえる。2008年に南カリフォルニア地域を対象に、サンアンドレアス断層南部を震源とするマグニチュード7.8の地震に対するShake Outシナリオと呼ばれる大規模な災害対応演習が実施された (Jones et al., 2008)。この地震がロサンゼルス市の水供給システムに与える影響を検討した結果、エリザベストンネルを横切る水平横ずれ断層変位は3.3 mとされ、トンネルは完全に閉塞することが指摘された。同時に、トンネル本体は断層運動に伴う強震動にもさらされるため、断層の両側では覆工の剥落や落盤などが生ずる可能性がある。また、地下水流入によりトンネル内が浸水する可能性もある。さらに周辺の地形

から判断すると、トンネル本体に対し、鉛直方向への突き上げや屈曲なども起こり得る。このようなことが起きれば、当然ロサンゼルス導水路の送水量は激減することが予想される。

ロサンゼルス市への水供給が滞る期間は、送水路全体の被災程度と復旧期間に依存する。Davis博士の試算では、最悪のシナリオで、原状復帰までに最長18か月を要し、中でも完全閉塞したエリザベストンネルの復旧に最も時間を要することが予測されている (Davis, 2010)。同氏によると、被災状況の調査や復旧作業は、岩盤の崩落やコンクリート片の落下、地下水の流入などによって危険を伴うものになる。さらに、復旧に当たっては地殻変動を加味した路床勾配を設定せねばならず、工事の難しさから復旧工事の期間が長引くことは明らかである。また、トンネル以外にも数キロメートルにわたる管路や水路の補修が必要になるとのことである。ただし、エリザベストンネルの復旧期間と比べると、これらの修復に要する期間はおおよそ3分の1程度であると見積もられている。

本稿を進めるにあたり2017年2月に Davis 博士にヒアリングし、現時点でのエリザベストンネルの耐震対策の現状について確認した。以下に紹介

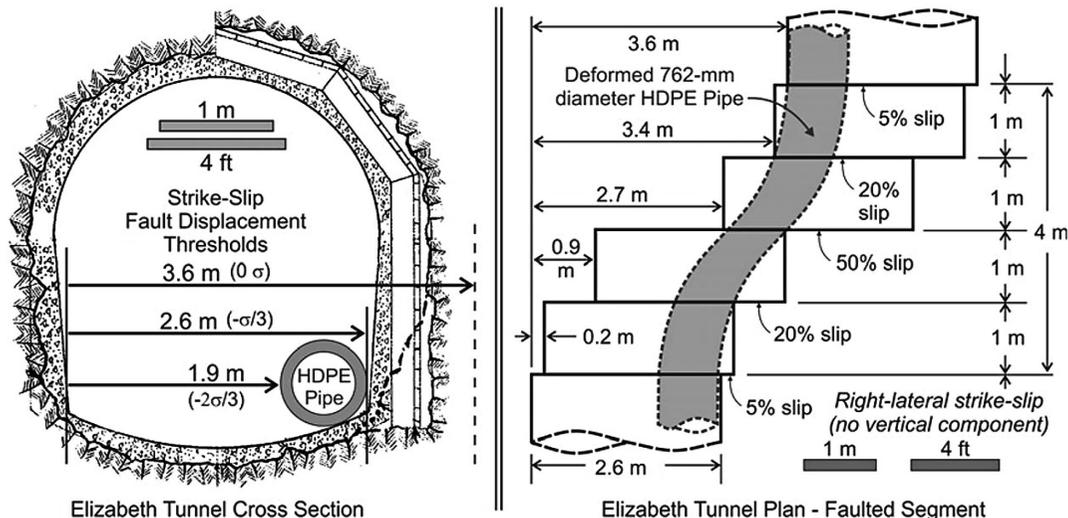


図7-3 エリザベストンネル内に設置する内挿管 (HDPE 管) の寸法と断層変位に対する追従性検討 (Sutherland, et al. 2014)

するが、詳細な地質・断層調査に基づき、より慎重に対応しようとする姿勢がうかがえるものの、実際に着手するには諸事情により時間を要するものと思われる。

現在、エリザベストンネルの耐震化のため図7-3に示すようにトンネル内に直径75 cm から90 cm のHDPE(高密度ポリエチレン)製の内挿管を布設する計画が進められている(Sutherland, et al. 2014)。HDPE管は、長さ4 m にわたって約3.6 m の水平変位を許容できるため、想定される断層変位(3.3 m)が周辺の岩盤の破碎を伴って発生する場合には、管路がたわむことで破断することなく有効に機能すると考えられる。しかし、複数の理由から依然として計画段階にあるとのことである。懸念材料は、トンネル軸に沿った周辺地山の強度が一様ではなく、断層地点の岩盤よりも弱い岩盤も存在するため、トンネルの崩壊地点を正確に予測することが現状では困難であるとのことである。また、別の理由は、HDPE管を入れるのではなく、トンネルそのものを断層変位に対応できるよう改修する案もあるとのことである。その他にも、熟練技術者が定年を迎え新たな人材の確保が難しくなっていることや、別の地点で優先度の高い改修計画があり、資源をそちらに投入する必要があるとのことである。なお、日本では直径5 cm から15 cm のHDPE管が日本水道協会規格に制定されている。

そのような中で、現在エリザベストンネル周辺では、より詳細な地質調査が実施されており、断層位置の特定と変位量を予測する試みがなされている。このような調査により、トンネル内での最適な内挿管の布設位置を決定することができる。これまでのところ、トンネル内面の幅約3 m に対し、50%の確率で断層変位が3 m 以下であると推測されており、この条件下においてはHDPE管を内挿管として導入することに合理性を見いだすことができるとのことである。また、1971年のサンフェルナンド地震時に断層崩壊が発生した地域であるフットヒル通りでは、2 mile (3.2 km) 間の3~4カ所で、最大3 m の断層変位が予測されており、対策として耐震継手ダクタイル鉄管が

布設される計画である。以上、ロサンゼルス導水路の耐震対策の現状をDavis博士の講演資料とヒアリングに基づき紹介した。

断層変位に対する琵琶湖第2疏水の耐震化へ向けての提案

琵琶湖疏水は建設後100年以上が経過し、昭和40年代に大規模な補修(昭和の大改修、京都市水道局(1990))が施されたとはいえ、これまでに1度も大きな地震動を経験してこなかった(例えば、第3章)。それは、図7-4に示すように、この100年の間に京都市周辺で大地震が発生していないという幸運に恵まれているからに過ぎない。琵琶湖第2疏水は、継続的な水需要を賄うため全面的に送水を止めて補修することができない。この弱点を補うための方策を、実現の是非は別途検討するとして、以下に提案する。

1) 現在、主として都市域の上水道管の布設替えの際、耐震継手を有する管路が一般的に用いられ始めている(例えば、日本ダクタイル鉄管協会(2017))。また、神戸市では先進的な事例として、活断層を横切る箇所にも管路の一部を撓ませることで大きな曲げに耐えうる断層用鋼管が布設されている(長谷川他(2015))。このような管をエリザベストンネルの事例に習い内挿管として第2疏水トンネル内に布設する。ただし、内挿管を全線に敷設するか、断層変位が予測される個所だけに布設するかは判断を要する。この管路にも常時通水するものとするが、万が一トンネルが損傷した場合でも、内挿管に被害がなければポンプによって圧送できるようにする。この場合、常時と比較して流量は低下するかもしれないが、京都市への水供給を滞りなく行うことのできるシステムを構築する。あとで試算結果を示すが、ある程度の水量が確保できれば消火用水として使うことができる。ただし、第4章で指摘されたように、琵琶湖疏水を横切る断層の位置を特定し、変位量を推定するための詳細な調査も必要になるであろう。また、第5章で紹介された、高精度な数値解析法を活用し地殻変動の想定に対する信頼性を確保することも重要である。

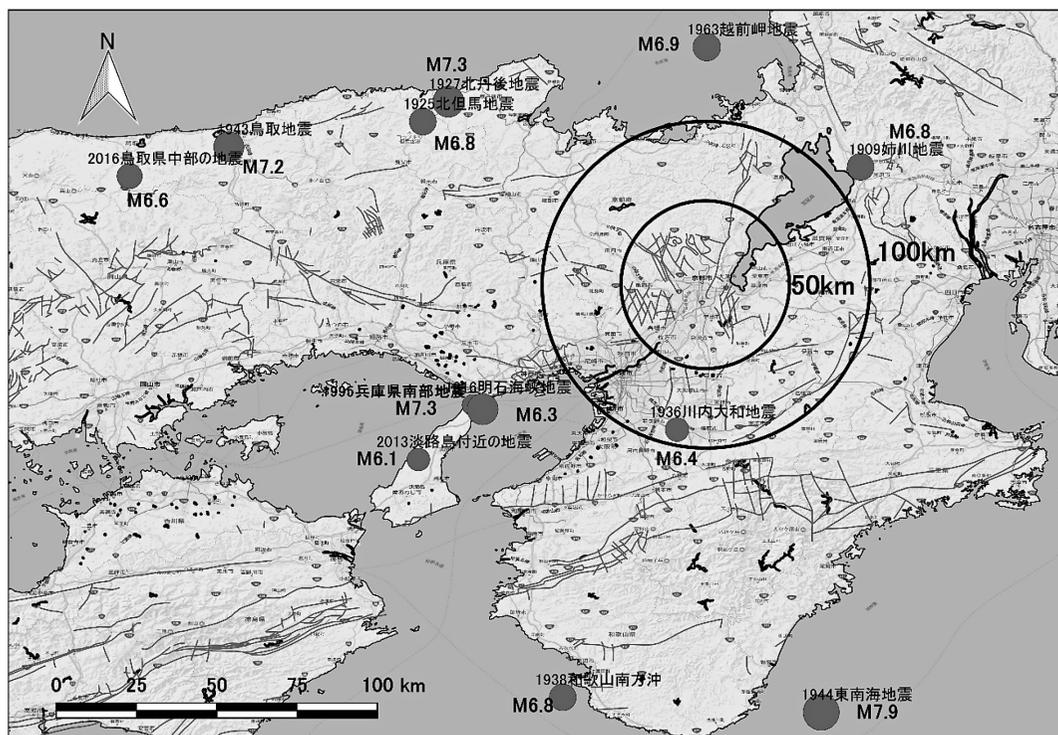


図7-4 1909年以降に近畿地方で発生した大地震の震央とマグニチュード並びに活断層の位置(国土交通省, 2017)

2) 断層変位が想定以上に大きく、内挿管が破断するなどの最悪の事態を想定し、地震直後から数か月といった長期にわたる断水を想定した復旧策を策定しておく。第2章、第6章で指摘されているように、京都盆地の地下水を臨時の水源として活用できる体制を構築しておくことも重要である。例えば、市民向けの啓発活動の一環として、年に数日間第2疏水を止め、井戸水を使う日を設け緊急時に即対応できる仕組みを作っておく。

3) 上記2)と関連するが、リダンダンシー確保のため、新たな水源を確保する。例えば、①亀岡市、宇治市等の水道網と大口径の管路で京都市の上水道と結ぶ。②琵琶湖の北湖から第3疏水を建設する。あるいは③北陸新幹線の建設に合わせ京都府北部の源地から導水管を新幹線に沿うように建設する。京都市と周辺の自治体とで災害時の協定を結ぶなど必要な方策はすでに取りられているものと思われるが、常時に多様な水源を確保し

ておくことも重要である。

以上、3つの方策を提案したが、上記1)について、田中他(2017)が行った内挿管で圧送可能な流量に関する試算例を紹介する。第2疏水の標準断面に対し、図7-5(a)は口径2.6 m、図7-5(b)は1.6 mの内挿管を布設した場合のイメージである。これらに加え、図には示さないが口径0.6 mとした場合についても試算されている。表7-2にこれらの内挿管を全線(7.4 km)にわたって布設した場合に吐出可能な流量の試算結果を示す。口径2.6 mの場合には、現在の第2疏水の流量である15.3 m³/sを確保することが可能である。口径1.6 mの場合には、口径2.6 mの半分の7.6 m³/sの流量を流すことが可能である。口径0.6 mの場合には、ポンプの全揚程が大きくなるため確保できる流量は0.6 m³/s (=36 m³/min)と試算されている。

ここで、口径0.6 mの内挿管の場合どの程度の消火用水が確保できるのか調べてみる。消防ポン

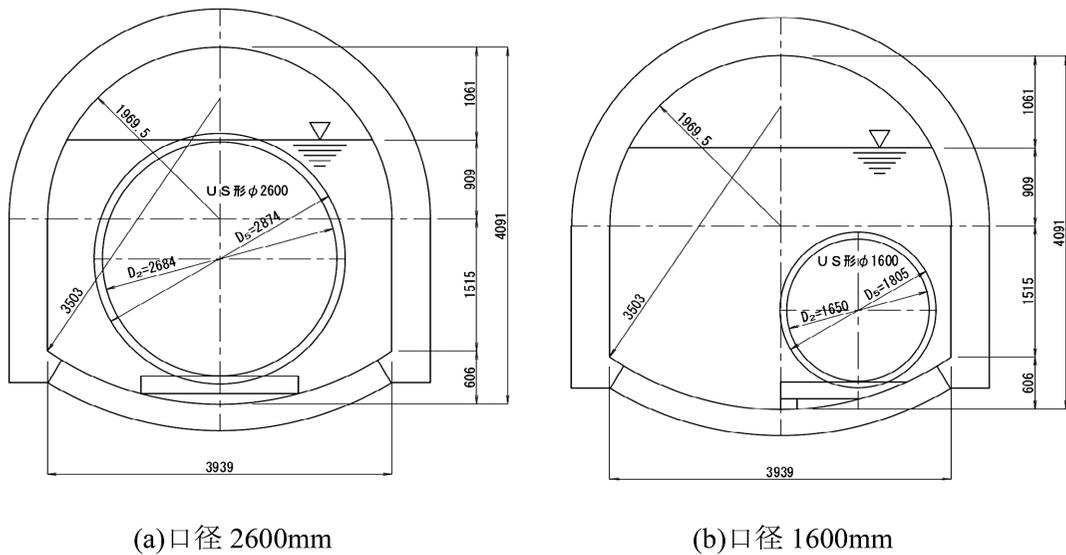


図7-5 耐震管を琵琶湖第2疏水トンネル内に設置した場合のイメージ：(a) 口径2600 mm，(b) 口径1600 mm (田中他, 2017)

表7-2 内挿管の口径とポンプ仕様 (田中他, 2017)

延長 (m)	7,400		
流量 (m ³ /s)	15.30	7.65	0.6
口径 (m)	2.6	1.6	0.6
流速 (m/s)	2.882	3.805	2.122
C 値	130	130	130
損失水頭 (m)	14.361	42.379	45.334
水位差 (m)	-3.40		
ポンプ廻り損失 (m)	2.00		
ポンプ全揚程 (m)	13.0	23.0	44.0
ポンプ形式	縦軸うず巻ポンプ		
ポンプ仕様	φ1800×459m ³ /min ×13m ×1300kW	φ1350×230m ³ /min ×23m ×1200kW	φ500×36m ³ /min ×44m ×400kW
ポンプ口径 (m)	1,800	1.35	0.5
ポンプ台数 (台) (1 台予備)	3	3	2
1 台あたりポンプ吐出量 (m ³ /s)	7.65	3.83	0.6
1 台あたりポンプ吐出量 (m ³ /min)	459	230	36
ポンプ軸動力 (計算値) (kw/ 台)	1,259	1,134	335
ポンプ効率	0.85	0.835	0.85
余裕	0.1		

ブ車 (A-1級) の規格放水量は2.8 m³/min 以上であるため (モリタ, 2017), 単純計算すれば, 口径0.6 m であっても, ポンプ車約13台分の流量は確保できることになる。ただし, 蹴上から火災発生地点までの流量損失を考えるとこれよりも少な

く見積もるべきであろう。一方, 断層変位が予測される地点周辺に限定して内挿管を設置し, 総延長を短くすれば, 損失水頭が減り流量を増やすことができる。以上, 琵琶湖疏水の耐震性確保に向けての方策を提案した。

おわりに

大地震による災害が発生した場合によく聞かれるのが、「対策はすでに検討しており、計画は実行直前であった」という言葉である。つまり、対策が必要な箇所は承知していたが実行できなかった、ということである。なぜ実行できなかったかについてはケースバイケースで様々な理由があるが、ロサンゼルス事例を参考にすれば、公費を投じることに對する慎重姿勢（例えば、断層変位の位置と変位量の正確な見積りが極めて難しく、さらに発生確率が小さな現象であること）、ほかの重要なプロジェクトへの人的・経済的資源の投入、熟練技術者の退職による作業効率の低下などが挙げられる。Davis 博士へのヒアリングを通じて実務者としての苦悩の一端を伺い知ることができた。日本においても事情は似ており、対策が実行されていないからと言って批判できるものではない。しかし、先人から受け継いだ遺産を次の世代に引き渡すことは、現代に生きる我々の義務である。琵琶湖疏水そのものも大きな遺産ではあるが、その下流に位置する京都市民の生活を守り、歴史的・文化的遺産を火災から守ることができるのは琵琶湖疏水により供給される水である。このように考えれば琵琶湖疏水の耐震化は、京都市にとって論を待つまでもなく最優先で取り組むべき課題であるといえる。

謝辞

本稿をまとめるにあたり、Los Angeles Department of Water and Power の Craig Davis 博士と Jianping Hu 博士には、貴重な資料と情報を提供いただいた。また、株式会社クボタの田中貴久様、戸島敏雄様には、内挿管で圧送可能な流量について試算いただいた。JEF エンジニアリング株式会社の長谷川延広様には、研究会において断層用鋼管について話題提供いただいた。記して謝意を表します。

参考文献

Davis, C. A. Los Angeles water supply impacts from a M7.8 San Andreas Fault earthquake

scenario, *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 59,6-7, pp.408-417, 2010.

Davis C. A. & Hu, J. Seismic design of water conveyance crossing fault. 拠点間連携共同研究「琵琶湖疏水の耐震性を考える－琵琶湖西岸断層帯が活動した場合の地殻変動と強震動の影響－」第1回勉強会資料, 2014.

Jones, L. M., Bernknopf, R., Cox, D., Goltz, J., Hudnut, K., Mileti, D., Perry, S., Ponti, D., Porter, K., Reichle, M., Seligson, H., Shoaf, K., Treiman, J. & Wein, A. The Shakeout Scenario, US Geological Survey OFR 2008-1150 and California Geological Survey Preliminary Report 25, 2008.

Seed, H. B., Lee, K. L., Idriss, I. M. and Makdisi, F. Analysis of the slides in the San Fernando Dams during the earthquake of Feb. 9, 1971, Earthquake Engineering Research Center 73-2, University of California, Berkeley, Calif., 1973.

Sutherland, M., Keaton, J. R., Heron, C. and Kuganenthira, N. Seismic Enhancements for Delivering Water to the City of Los Angeles across the San Andreas Fault in the Elizabeth Tunnel, Geo-Congress 2014 Technical Papers: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability, GSP 234, 2014.

京都市水道局, 琵琶湖疏水の100年<資料編>, 255p., 1990

国土交通省, 国土調査 GIS データのダウンロード, 土地分類基本調査「その他」, <http://nr-bwww.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/download/>, 2017 (2017.3.2閲覧).

田中貴久・戸島敏雄, 株式会社クボタによる内挿管で通水可能管な流量の試算, 私信, 2017.

長谷川延広・長嶺 浩・今井俊雄:断層用鋼管の開発, 工業用水発表会, 工業用水協会, 2015.

日本ダクタイル鉄管協会: GX 形ダクタイル鉄管管路の設計, 日本ダクタイル鉄管協会技術資料, JDPAT 57, 2016.

モリタ, 株式会社モリタホームページ, <http://www.morita119.jp/faq/>, 2017 (2017.3.3閲覧).

8. おわりに

2011年東日本大津波の後、「想定外」という言葉が様々な方面から聞かれた。つまり、あれほどの規模の地震動と津波を想定して災害対策をとっていなかった、あるいはそのような規模の災害素因

を想定しては経済的に折り合わないということであった。しかし、その直後から、「はじめに」でも述べたように、最新の科学的知見を積極的に発信して災害の軽減に貢献しなければならないという機運が高まってきた。これは地震学をはじめ、耐震工学、海岸工学、地震防災・減災対策等にかかわる研究者、技術者たちの大いなる反省に基づいている。本特集で紹介した研究のベースとなった東京大学地震研究所と京都大学防災研究所が主体となる拠点間連携共同研究も、そのような流れの中で生まれた研究プログラムである。本研究の成果を、ひとつの足掛かりとして琵琶湖疏水の耐震化への関心が高まり、近い将来適切な耐震対策が施されることを期待する。ついでながら、琵琶湖疏水の建設にあたっての主任技術者であった田辺朔郎博士は両大学にかかわりが深く、この点からも琵琶湖疏水について両研究拠点が連携して問題提起したことは意義深い。

近年、京都市は、春と秋に琵琶湖疏水クルーズとして第1疏水の天津-蹴上間を船で巡るという試験的なツアーを組み、今後その通船事業を観光の目玉として実施しようとしている。100年以上前に建設され、現代においてもその役割を減ずることなく果たしている琵琶湖疏水の文化的・社会的価値を広く知ってもらうためには非常に良い企画である。しかし、本特集で指摘したように京都市の水資源がおかれた危うさを認識した今、やるべきことは観光客の誘致に勤しむことだけではない。「琵琶湖疏水問題」はもはや想定内の問題である。