

重要文化財後背斜面における比抵抗法電気探査を用いた 地下水帯の把握

Detection of groundwater in the slope behind an important cultural asset using an electrical resistivity survey

檀上徹¹・高倉伸一²・有光悠紀³・藤本将光⁴・石澤友浩⁵・深川良一⁶

Toru Danjo, Shinichi Takakura, Yuki Arimitsu, Masamitsu Fujimoto, Tomohiro Ishizawa and Ryoichi Fukagawa

¹国立研究開発法人防災科学技術研究所 特別研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Fellow, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

²国立研究開発法人産業技術総合研究所 上級主任研究員 (〒305-8567 茨城県つくば市東1-1-1)

Chief Senior Researcher, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

³立命館大学大学院博士課程前期課程 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Ritsumeikan University, Mater's Course of Science and Engineering

⁴立命館大学助教 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

⁵国立研究開発法人防災科学技術研究所 主任研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

Senior Researcher, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

⁶立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

The purpose of our research is to apply an electrical resistivity survey for detecting of groundwater in the slope behind an important cultural asset. The results indicated that there were constantly two groundwater area under the rock surface. Considering the pore-water pressures at rock surface, the measurement value may indicate the groundwater. In addition, the result of electrical resistivity survey was shown as same as the previous research results of the measuring method of sound of groundwater flow and one-meter depth ground temperature. Therefore, it can be shown that the positions of groundwater were detected using the electrical resistivity survey.

Keywords : groundwater, monitoring, resistivity

1. はじめに

降雨に伴う斜面災害が日本各地で毎年のように発生する中、これまで斜面災害の軽減に向けたセンサ開発、予測手法の開発、現地観測等が数多くなされている。特に斜面崩壊の多くは「水」に起因した発生が主であり、恒常的に存在する地下水や水みちの場の把握や、降雨時に一時的に発生するそれらの場を把握することは、崩壊発生場の予測を行う上で重要である。石澤ら^{1), 2)}は、崩壊発生前の累乗的な加速クリープ段階に変位速度の逆数予測法を適用することで、斜面崩壊の発生時刻の予測が室内実験レベルでは可能であること、地下水位と斜面変位とは密接な関係があると述べている。したがって、これら計測または手法を斜面崩壊の発生時刻の予測へ適用するに当たり、計測センサの設置箇所の選定が非常に重要である。

清水寺境内における重要文化財後背斜面では、2004年以降テンシオメータを用いた地盤内の間隙水圧をモニタリングするシステムを構築し、地盤内の水分量変化を長期に亘り計測している³⁾。また、同斜面において仲矢ら^{4,5)}により、地下水帯の面的な把握に向けた1m深地温調査に基づく水みちの推定がなされた。さらに藤本ら⁶⁾は、簡易に計測が可能な地中音測定を用いた地下水流動の把握を行った。しかしながら、テンシオメータを用いた計測は深度方向への面的な把握に限界があること、1m深地温探査は探査に際して気温や植生の影響を受け易いこと、地中音測定は多くの観光客に起因する雑音等のノイズが計測環境に大きく影響することが課題に挙げられている。また、既往の地下水帯の推定は幅（広い面積）をもっており、さらなる空間的な位置（面的な位置と深度方向の位置）を特定することで、斜面崩壊発生場の予測ならびに崩壊発生時刻の予測に向けた効率的な観測場の設定に寄与できると考える。

そこで本研究では、空間的に水分量を可視化し地盤内の非破壊で探査できる手法の一つである比抵抗電気探査法（以後、電気探査法と呼ぶ）を用いて、これまで推測された水みちの詳細な把握を試みる。

2. 調査方法

(1) 電気探査法

電気探査法⁷⁾とは、地下に電流を流し、それによって生じる電位を測定することで、地下の比抵抗の分布を求めるものである。一般に数十cmから数千m深さまでの探査が可能であることから、地熱・温泉・鉱山・地下水の調査などにおいて、地下を可視化する手法として幅広く利用されている。探査深度は電極の設置間隔によって決まり、電極間隔を大きくするほど深部の探査が可能となる。一方、解像度は探査深度とトレードオフの関係にあり、電極間隔が大きくなるほど解像度は低下する。逆に電極間隔を小さくすると、表層部分を詳細に見ることが可能となる。

計測された電流値と電位値から計算される比抵抗値は、地下構造が均質と仮定している。実際の地下構造は不均質であることから、この値は真の比抵抗を意味するものではない。しかし、この値は地下の比抵抗分布を反映したものであり、計測した電極周辺の探査深度までの平均的な比抵抗値と考えることもできる。そのため、この比抵抗値を「見掛け比抵抗値」として取り扱っている。様々な電極を組み合わせた配置で、複数の見掛け比抵抗値を求め、そのデータを解析することで地下の真の比抵抗分布を求めることができる。

比抵抗は電気の流れにくさを表す物性値であり、地盤中の間隙の大きさ、間隙に含まれる水分量、その水の比抵抗、地温等が複合的に反映される。したがって、求まる比抵抗値が主として何に起因するかを認識することが重要である。また、比抵抗の変化から調査の対象物の変化を把握するためには、その対象物の変化が比抵抗に及ぼす影響を理解する必要がある。

地盤の比抵抗変化に影響する要因について表1に示す。本研究では地盤内の地下水帯の検知を主目的にし、電気探査の計測を同地点で短期間に数回実施した。地盤を形成する鉱物のほとんどは絶縁体であり、地下水は100Ωm以下であることが多いので、水分量が多くなる場所ほど比抵抗は低くなると考える。短期間では、間隙率、粘土鉱物の含有量、地下水の電導度はほぼ変わらないとする。また、地温については、地表面では気温と同様に季節変動があるものの、本研究では3.0m以深での議論を行うため、経験上、比抵抗値の結果に大きな影響がないことから、地盤内の水分量のみが比抵抗値の変化を及ぼすと仮定して、電気探査結果の考察を行うものとする。

表1 比抵抗値の影響に関する要因

要因の項目		地盤の比抵抗の変化		関連項目・現象
		低比抵抗	高比抵抗	
間隙率	飽和時	高い	低い	風化, 破碎帯
	乾燥時	低い	高い	
飽和度(間隙率一定)		高い	低い	浸透, 地下水
粘土鉱物(導電性鉱物)		多い	少ない	風化, 変質
地下水の電導度		高い	低い	塩水など
温度(地温)		高い	低い	地熱, 温泉

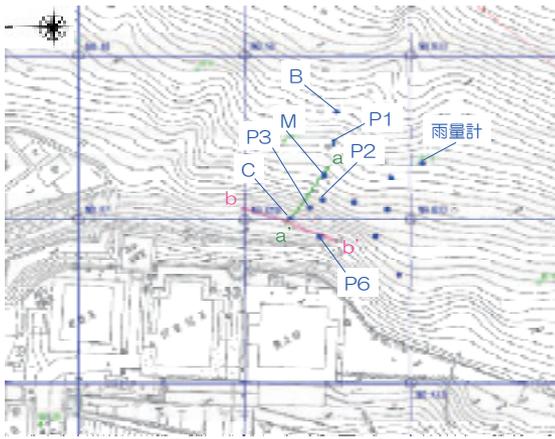


図1 電気探査の計測測線
(縦断測線 a-a' : 黄緑, 横断測線 b-b' : 桃色)

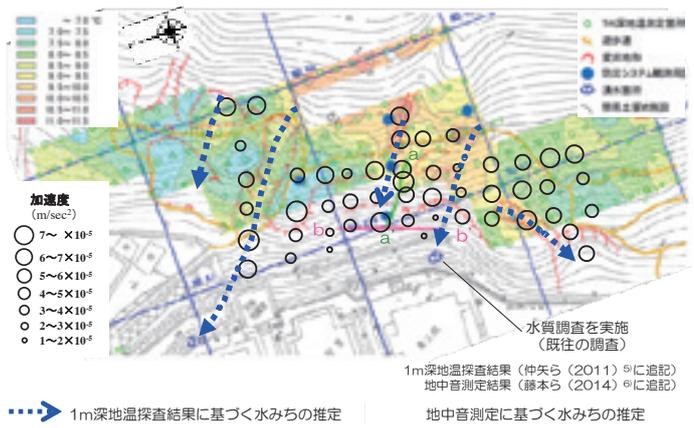


図2 既往の水みち調査結果と電気探査の位置

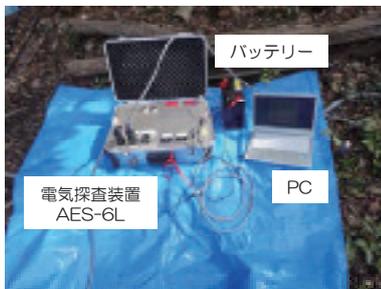


図3 電気探査の測定機器

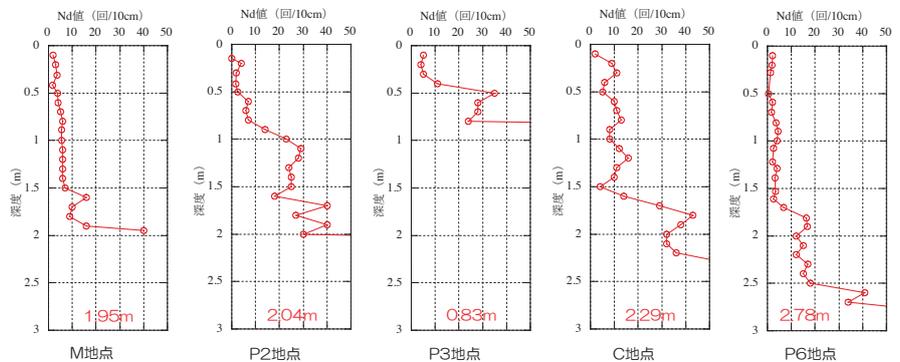


図4 各地点の簡易貫入試験結果

(2) 電気探査の概要

電気探査は、テンシオメータが設置されたモニタリングシステムのM地点からC地点までの縦断測線（黄緑色）とC地点を中心とした横断測線（桃色）において計測を行った（図1）。また、図2では仲矢ら^{4),5)}による1.0m深地温調査結果と藤本ら⁶⁾による地中音測定から得られた既往の結果に、電気探査測線の位置を重ねている。両測線とも水みちが推定された範囲内で計測を行うように設定した。両測線とも18.0mの長さで、電極を0.5m間隔（斜距離）に37本配置している。なお、電極の位置は測量機器のimpulse（Laser Technology社）を使って測量した。縦断測線では2014年8月29日、11月20日、12月9日、2015年2月27日の計4回実施し、横断測線では2014年12月9日、2015年2月27日の計2回実施した。

電気探査の測定には、協同電気社製の多チャンネル電気探査装置AES-6Lを用いた（図3）。本装置は、流送部、電位受信部および64chスキャナがトランクケースに内蔵されており、12Vのバッテリーを電源とする。データの収録はパソコンで制御し、送信する交替直流の強度と周期、データのサンプリング間隔、スタッキング数（測定回数）などの測定パラメータは任意に決定することが可能である。電極配置は、ダイポール・ダイポール配置とウェンナー配置を組み合わせた。異なる電極配置を組み合わせることにより、ノイズによる虚像の発生が抑えられ、分解能や精度の高い解析結果が得られる⁸⁾。本研究では、表層崩壊を対象とした調査を目的としていることから、深度5.0mまでの比抵抗分布を詳細に求めることを目標とした。そこで、最小電極間隔は0.5m、最大電極間隔は6.0mという条件下で計測を行った。

(3) 雨量計測と間隙水圧計測

重要文化財後背斜面では、2004年以降テンシオメータを用いた間隙水圧のモニタリングシステムを構築し長期計測を実施している。2012年には既存の5地点から14地点へと観測点を増設し、それらに伴う簡易貫入

試験を実施することで土層厚の把握を行っている⁹⁾。図1に示すM, P2, P3, C, P6地点における簡易貫入試験結果を図4に示す。本研究では、電気探査の測線上に位置するC, P6地点の土層と基盤面の境界面に位置する間隙水圧結果を電気探査結果と比較するために用いた。なお、C地点およびP6地点では地表面から230cm, 280cmの深さにテンシオメータを設置している。ここで、M地点も測線上に位置するが、電気探査の測線上の端に位置するため、電気探査で得られた結果がM地点の基盤層深さ(200cm)まで示すことができなかったことから、比較の対象から外すこととした。降雨量は、観測点に設置した1カウント0.01インチ(0.256mm)の雨量計を用いてデータを取得した。計測前日から1週間前までの総降水量は、2014年8月29日で86.1mm, 11月20日で0.0mm, 12月9日で15.5mm, 2015年2月27日で22.6mmであった。

3. 結果と考察

(1) 電気探査を用いた地下水帯の把握

電気探査の計測日ごとのデータを解析し、比抵抗断面を求めた。各計測日における縦断測線の解析比抵抗

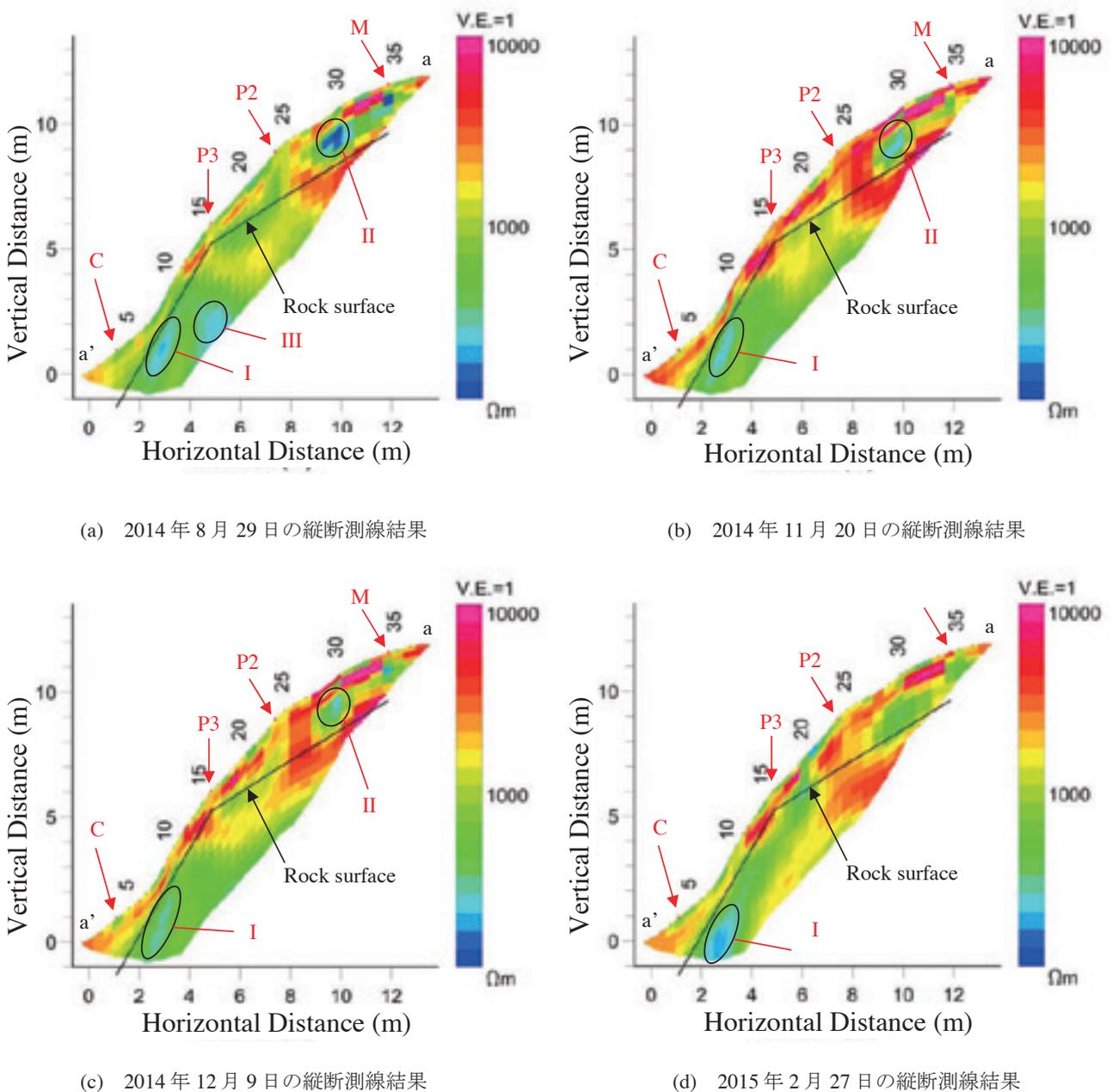


図5 各計測日における縦断測線の解析比抵抗断面

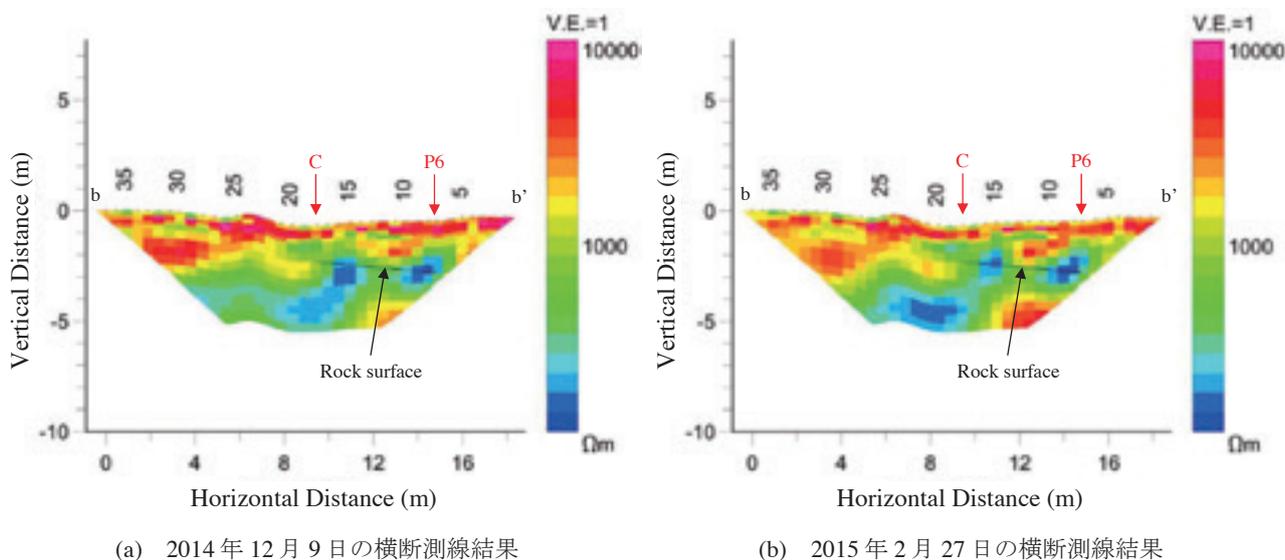


図6 各計測日における横断測線の解析比抵抗断面

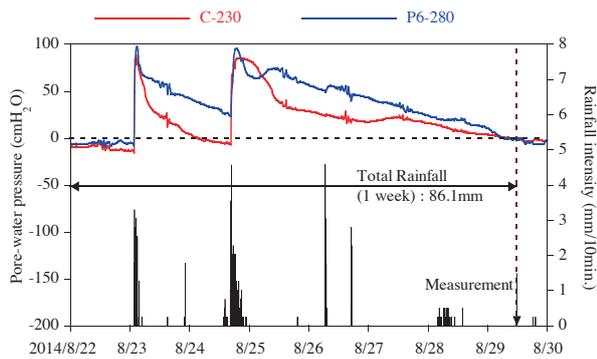
断面を図5に示す。図内に示す各地点の番号 (M, P2, P3, C) は、テンシオメータを用いた間隙水圧のモニタリング位置を示しており、電気探査の縦断測線とモニタリングの位置は現場においては一致していないが、比較的近距离にあり間隙水圧の結果ならびに地盤調査の結果と比較するため、ここでは同一直線上にあると仮定して図に示す。図内の赤色は比抵抗が高く、青色は比抵抗が低い色のコンター表示となっているため、水分量が多いと想定される場所については青色が表示される。計測結果のいずれにおいても「I」のエリアは青色になっていることから、事前降雨量に関わらず恒常的に低比抵抗帯が存在することがわかる。また、8月29日の結果 (図5(a)) では、「I」の青色のエリアの他に「III」のエリアがあることから、他の計測結果と比べ広いことが見てとれる。特に8月29日の事前降雨量は他の計測日に比べ多かったことから、恒常的な低比抵抗帯の他に、一時的に発生した低比抵抗帯が示されたと考える。一方、「II」のエリアも結果から判断すると「I」と同様に恒常的な低比抵抗帯があるように見える。しかしながら、この「II」ではモニタリングシステムの構築の際 (2004年) に光ファイバー計測のための短管が現在まで地面に設置されているため、電極の影響を受けたと考える。

図6に12月9日と2月27日における横断測線の解析比抵抗断面を示す。C地点を中心として両側に9.0mの幅を計測している。縦断面で見られたC地点付近の低比抵抗帯は、横断面でもはっきりと計測されている。図6では、図4に示されたC, P6地点の簡易貫入試験結果を反映させており、これらの結果からC地点付近の低比抵抗帯は基盤層内にあることがわかる。一方、P6付近においても基盤層周辺に低比抵抗帯があることから、図2で示された既往の水みち推定の中央部において、2つの低比抵抗帯があると判断できる。

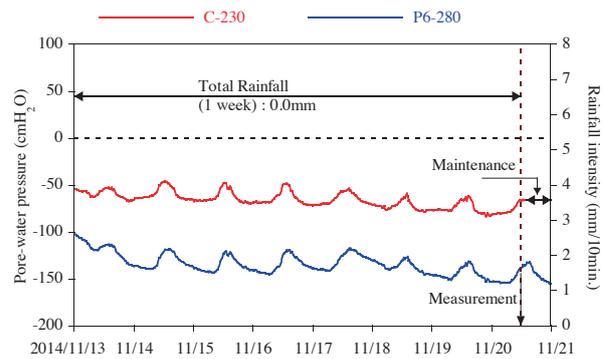
以上のことから、縦断測線の結果より斜面下側に位置するC地点付近の基盤層内に、降水量に関わらず低比抵抗帯があることがわかった。また、横断測線の結果よりP6地点の基盤層内にも恒常的な低比抵抗帯が推定されたことから、比抵抗値の結果より計測断面内では2つの低比抵抗帯があると判断できる。

(2) 間隙水圧値との比較

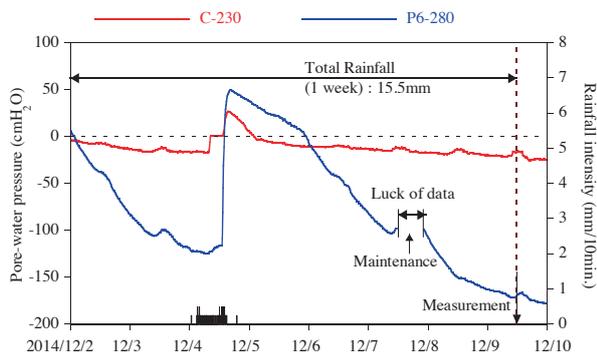
電気探査の結果よりC地点およびP6地点付近で低比抵抗帯が確認されたことから、本節では間隙水圧の結果を用いて電気探査結果で得られた比抵抗値について比較検討する。図7に計測日から1週間前までの各地点 (C, P6) における土層と基盤層の境界面に設置したテンシオメータの間隙水圧値と降雨量の時系列変化を示す。図7(a)より、降雨量が多い8月の間隙水圧値は両地点とも正圧を示していることから、土層と基岩層の境界面で地下水が発生していることがわかる。また、P6地点では降雨による地下水位の上昇量が多く、一時的に水が集まりやすい場所であることが推測される。一方、C地点は降雨後の間隙水圧の減少量が小さいことから、降雨後も排水されにくい地盤環境であることが示唆され、計測の約1週間前から常時地下水があったことがわかった。計測の1週間前から無降雨が続いた11月の間隙水圧値は、結果 (図7(b)) に示す通り、



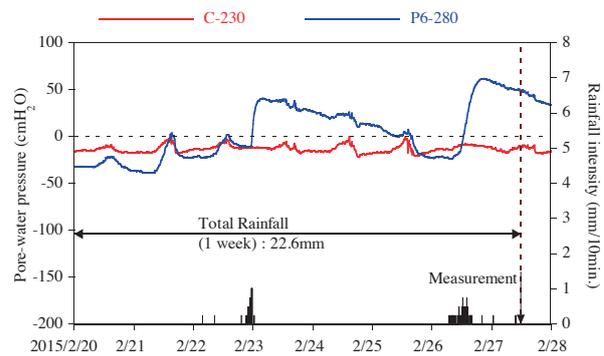
(a) 2014年8月22-30日



(b) 2014年11月13-21日



(c) 2014年12月3-10日



(d) 2015年2月20-28日

図7 各計測日における土層と基盤の境界面の間隙水圧と降雨量

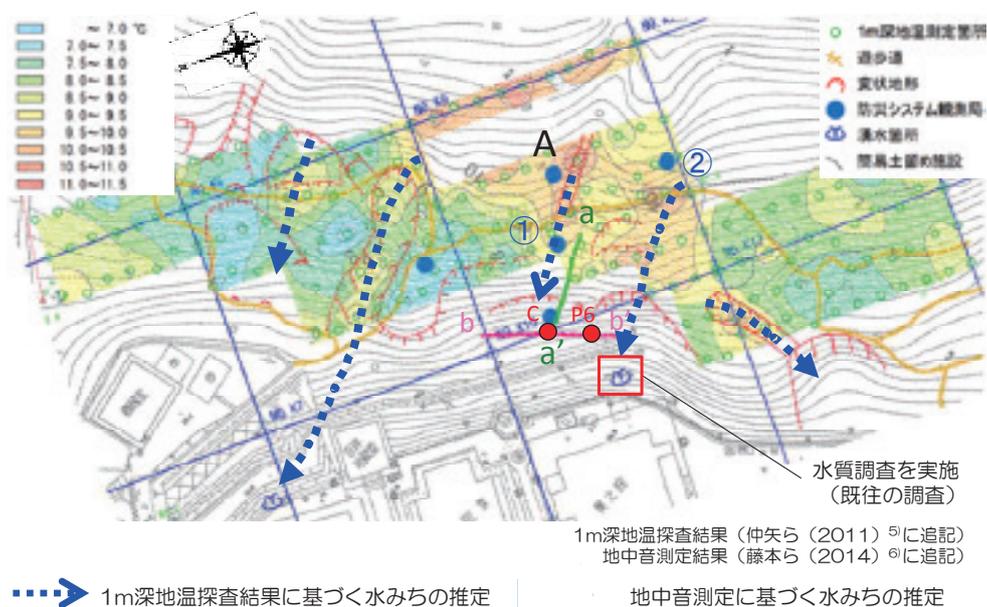


図8 既往の水みち推定と電気探査による地下水帯の検知箇所

負圧状態が続いている。そのため、土層内において恒常的な地下水は存在せず、降雨時のみ土層内に地下水帯が見られることがわかる。また、12月、2月（図7(c), 図7(d)）の結果からも降雨直後のP6地点の間隙水圧

値の上昇量は大きい。さらに、2月27日の電気探査測定時にP6地点のテンシオメータの間隙水圧値が正圧を示しており、基盤層から約50cmほどの地下水帯が存在していることになる。12月と2月における横断測線の解析結果（図6(a),(b)）を見ると、P6地点の低比抵抗帯が表層側にも広がっていることが図からも読み取れる。つまり、電気探査で示された低比抵抗帯（青色や水色）は、テンシオメータ結果との比較から、地下水帯に対応することを示唆している。また、間隙水圧値と同様な位置に地下水帯を捉えていることから、電気探査の計測結果は十分な精度を有していると判断できる。したがって、電気探査法を実施することでテンシオメータではその設置地点でしか捉えられない地下水帯を空間的に把握でき、電気探査法によるモニタリングを行うことで地下水帯の移り変わりを可視化できると考える。

以上のことから、C地点およびP6地点の土層内には恒常的な地下水帯はなく、降雨時および降雨直後に一時的に地下水帯が発生していることがわかった。2月のP6地点において、テンシオメータが示す土層内の地下水帯の深度と同様に、電気探査の結果も示していることから、地下水位の上昇と下降および地下水帯の一時的な発生について経時的に捉えることができると考える。

(3) 既往の水みち調査との比較

これまで対象斜面では、仲矢らによる1.0m深地温探査および藤本らによる地中音測定に基づく水みちの推定がなされてきた（図8）。今回の電気探査の結果より、C地点付近に地下水帯があることがわかり、これは仲矢らが推定した青色矢印の①に相当している。また、P6地点付近にも同様に地下水帯が示されており、青色矢印の①と②の間に位置している。一方、藤本らが推定した水みちAは幅を持っており、今回の結果はこの中に含まれている。また、仲矢¹⁰⁾は湧水の水質調査を行った結果、降雨の有無に限らず水質（イオン組成）は安定していると述べている。そのため、①で示す水みちは雨水の直接的な浸透の影響を受けない深層部（基盤層境界面以深）を流れている可能性があると考えられる。電気探査の結果からも基盤層境界面以深に恒常的な地下水帯が推定されたことは、この考察を支持している。

以上のことから、電気探査の結果は既往の水みちの推定と整合的であり、電気探査を行うことで従来より詳細に地下水帯の位置を特定することができたと考える。

4. おわりに

本研究では、斜面崩壊の要因である地盤内の地下水帯の空間的な位置（斜面上の位置と深度方向の位置）を特定し、斜面崩壊の発生場の予測ならびに崩壊発生時間の予測に向けた効率的な観測場の設定を目指している。そこで本論文では、清水寺後背斜面において電気探査法を用いたモニタリングを実施することで、地盤内の地下水帯の把握を試みた。以下に今回得られた知見について示す。

- 1) 電気探査の結果とテンシオメータの計測結果を比較すると、奥之院後背斜面における低比抵抗帯は地下水帯に対応する。
- 2) 縦断測線の解析比抵抗断面より、C地点付近（斜面の下部）の基盤層内に降雨に関わらず恒常的な地下水帯があることがわかった。
- 3) 横断測線の解析比抵抗断面より、C地点付近ならびにP6地点付近の基盤層内に恒常的な地下水帯があることがわかった。
- 4) C地点およびP6地点の基盤層に対して表層には恒常的な地下水帯はなく、降雨時および降雨直後に一時的に地下水帯が発生していることがわかった。また、2月のP6地点において、テンシオメータが示す土層内の地下水帯の深度を同様に電気探査結果も示していることから、地下水帯の上昇と下降および一時的な発生について経時的に捉えることができると考える。
- 5) 電気探査の結果は既往の水みちの推定とほぼ一致しており、電気探査を行うことでより詳細な地下水帯の位置を特定できたと考える。

以上のことから、ボーリングによる地下水調査を行うことで音羽の滝の水質変化への影響を及ぼすことが示唆される清水寺において、電気探査により奥之院後背斜面の地下水帯の位置を特定できたことは、崩壊ヶ所の予測ならびに斜面崩壊予知に向けたモニタリング位置の選定に大きく寄与できるため、文化遺産周辺の地盤を乱すことなく土砂災害から文化遺産を守る上で重要な意味があると言える。また、本論文で取り上げた探査・計測手法については、未だ定量的な評価が難しい部分もあることから、相互関係についても検討し

ていく必要がある。今後は、さらに範囲を広げて計測し、斜面内の地下水帯の把握することで、斜面崩壊発生場の予測ならびに崩壊発生時刻の予測に向けた効率的な観測場の設定を行っていきたい。

謝辞：本研究を実施するに当たり、元立命館大学（現大阪府役所）の木村亘様には現地における電気探査の補助ならびに雨量計測、間隙水圧計測のデータ収集を行って頂いた。また、国立研究開発法人防災科学技術研究所の佐野綾子様には、図の作成に当たり貴重なご指導を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 石澤友浩・酒井直樹・諸星敏一・福囿輝旗：傾斜計を用いた斜面崩壊時の地中内部変位計測による崩壊予測の有効性，日本地すべり学会誌，Vol.50，No.6，pp.256-267，2013.
- 2) 石澤友浩・酒井直樹・福囿輝旗：模型実験による斜面変位速度の経時変化と崩壊予測手法に関する検討，日本地すべり学会誌，Vol.50，No.6，pp.268-2278，2013.
- 3) 深川良一・酒匂一成・里見知昭・石田優子・仲矢順子・安川郁夫：降雨時斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地多点モニタリング，歴史都市防災論文集，Vol.2，pp.99-104，2008.
- 4) 仲矢順子・酒匂一成・光谷俊祐・深川良一：急勾配斜面表層における水文環境—清水寺後背斜面における地下水流路調査—，歴史都市防災論文集，Vol.4，pp.83-90，2010.
- 5) 仲矢順子・深川良一・酒匂一成：清水寺後背急勾配斜面における地盤表層地下水流路の調査と分析，歴史都市防災論文集，Vol.5，pp.271-278，2011.
- 6) 藤本将光・檀上徹・土山拓也・木村亘・深川良一：清水寺後背斜面における地中音測定を用いた地下水流動の把握，歴史都市防災論文集，Vol.8，pp.145-150，2014.
- 7) 島裕雅・神谷英樹・梶間和彦：比抵抗映像法—建設・防災・環境のための新しい電気探査法，古今書院，pp.1-51，1995.
- 8) 高倉伸一・吉岡真弓・内田洋平・石澤友浩・酒井直樹：比抵抗モニタリングによる盛土中の水分変化の推定，物理探査，Vol.65，No.4，pp.229-236，2012.
- 9) 木村亘・藤本将光・檀上徹・深川良一：重要文化財後背斜面における地盤特性および地盤内水分変動関係に関する考察，平成25年度土木学会関西支部年次学術講演会，Ⅲ-5，2013.
- 10) 仲矢順子：重要文化財後背斜面における表層崩壊の要因となる表層地下水流の探査，博士論文，pp.9-24，2011.