

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

Detection of groundwater movement using a measuring method of sound of groundwater flow on the hillslope behind Kiyomizu Temple

藤本将光¹・檀上徹²・土山拓也³・木村亘⁴・深川良一⁵

Masamitsu Fujimoto, Toru Danjo, Takuya Tsuchiyama, Toru Kimura and Ryoichi Fukagawa

¹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)
Assistance Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

²独立行政法人防災科学技術研究所 特別研究員 (〒305-0006 茨城県つくば市天文台3-1)
Fellow, Natinal Research Institute for Earth Science and Disaster prevention, Dep of Storm, Flood and Landslide Research

³元立命館大学学部生 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)
Former Student, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

⁴立命館大学大学院博士前期過程 理工学研究科環境都市専攻 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Graduate Student, Ritsumeikan University, Master's Course of Science and Engineering

⁵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

We evaluated the groundwater movements based on the measurement of a sound due to groundwater flow in soil. The results indicated that there were specific movement of groundwater flow and groundwater area. Consideringe the pore-water pressures in soil layer, these groundwater flow paths may exist in weathered bedrock zone below the soil layer. Our findings were mainly corresponded to the presious results obtained by the measurement of groundwater temperature at one meter depth in the soil, indicating that measurement method of sound by groundwater flow is good indicator to detect the groundwater flow path.

Keywords : *groundwater movement, sound of groundwater flow, slope failure*

1. はじめに

近年豪雨の頻度の増大に伴い、斜面崩壊が多発、大規模化する傾向にある。2013年9月の台風18号では近畿地方でも土砂災害が多発し、清水寺においては大小あわせて5箇所の斜面崩壊が発生した。降雨が夜間に集中したため観光客の人的被害は発生しなかったが、音羽の滝周辺の茶屋の屋根に土砂が被る被害(写真1)や子安の塔下の斜面が崩落する被害にみまわれた。降雨の規模やタイミングが少しでも異なれば、観光客が被災する危険も危惧された。

斜面崩壊を発生させる要因として地盤内の地下水の動態が重要であることが指摘されている。実際に、地盤内の水移動の不均一性やその斜面崩壊に与える影響は実験レベルや現場観測において検証されている^{1) 2) 3)}。しかし、地盤内の構造が不均一であり、それに支配される水の流動を原位置で把握することは非常に困難である。清水寺後背斜面では土層内の間隙水圧をモニタリングするシステムを構築し、地盤内の水分量動態の

計測が継続して行われてきた^{4) 5)}。また、広範囲を面的に把握するために、1m深地温調査に基づいて水みちの推定が行われた^{6) 7)}。しかし、テンシオメータによる間隙水圧の計測には深度方向や計測密度の面で限界があることや1m深地温計測手法には計測上の課題があることが指摘され、異なる手法を用いた多角的な地下水流動の評価が求められている。そこで本研究では、比較的簡易に調査を行うことが可能であり、広範囲の詳細な地下水流動を把握することが可能である、地中音測定法を用いて清水寺後背斜面における地下水流動の把握することを目的とした。



写真1 2013年台風18号における斜面崩壊の様子

2. 調査方法

(1) 地中音測定法

地中では流れる水が岩盤の亀裂や土粒子の間隙に存在する空気と交換されることで気泡が発生し、また、その気泡が割れることで曝気音が発生する。地中音測定はこの曝気音を地中音測定装置によって測定し、音の強弱によって地下水の存在を判別することで、水みちの位置を特定させる手法である³⁾。

本研究では、株式会社拓和製のGAS-03を用いて測定を行った。地下流水音測定装置は、ピックアップセンサ、測定部、ヘッドフォンで構成されている。測定時に確実に固定を行うために、φ0.8×100mmから200mmのステンレス棒をピックアップセンサ（写真-2）へ取り付け、これを地表面から土中に挿入することで地表面で捕らえられる地下流水音（振動）をセンサ部で計測する。測定部はピックアップセンサで捉えた地下流水音を増幅させるアンプ、風等の雑音を遮断するノイズカットフィルターが搭載されている。ノイズカットフィルターはピックアップセンサで捉らえた音のうち特定の周波数帯の音を取り出すことで、現場に応じて測定対象となる地下水の流水音のみを聞くことが可能となる。現地ではヘッドフォンを使って実際に音を確認しながら良好に計測ができているかを判断する。



写真2 ピックアップセンサと固定用ステンレス棒

(2) 地中音測定の概要

測定は清水寺現地モニタリングシステムとして使用しているM地点を基準として、測定可能な場所を選びながら約5m間隔で等高線に沿って12点を設定し、等高線に垂直に3点の測定地点を設定した。また、より詳細な結果を得るために設定した測定点以外の点においても計測を行った。全計測点を図1に示す。計測は2013年12月20日、2014年1月10日、1月16日、1月17日の4日間で行った。2013年12月20日、2014年1月10日は主として設定した測定点で計測を行い、2014年1月16-17日はより広範囲で計測を行った。計測点数は、2013年12月20日に35点、2014年1月10日に38点、2014年1月16-17日の2日間で28点であった。

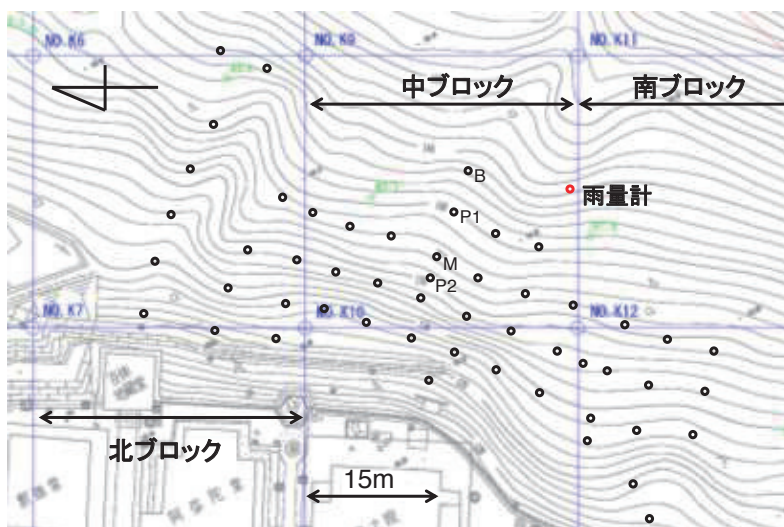


図1 調査対象斜面の地形図と計測点の位置図

なお、計測日前の5日間の降雨量は、2013年12月20日で総降水量2mm、時間雨量1.4mm、2014年1月10日で総降水量11.4mm、時間雨量0.8mm、2014年1月16日で総降水量2mm、時間雨量0.2mmであった。計測期間中は

阿弥陀堂、奥の院の工事が行われており、工事に伴う音が大きかったため、その影響をなくすために早朝に計測を行った。本研究では300～1200Hzの周波数の範囲で地下水音（振動）を計測した。また、測定は各地点で10回程度行い、得られた結果（最大値）の平均値を求めた。本研究では、計測した結果を加速度に変換して用いた。

(3) 降水量と間隙水圧の計測

清水寺後背斜面では、2004年度より土層中の間隙水圧の計測を行っている^{4) 5)}。また、地下水帯は不透水地盤面で形成されるため、土層－基盤境界面における間隙水圧の計測を2012年より行った。本研究では調査期間中に良好なデータが得られたB、M、P1、P2地点の計測結果を取り扱った。B、M、P1、P2地点の計測深度はそれぞれ200cm、190cm、65cm、200cmである。また、対象斜面において雨量の計測を行った（図1中赤丸地点）。

3. 結果と考察

(1) 地中音測定法を用いた水みちの推定

図2に2013年12月20日、図3に2014年1月10日の計測結果を示す。計測結果を面的にわかりやすく表示するために、各点の計測結果を円の大ききで示した。12月20日の結果では北ブロックと中ブロックの境界付近から南方10m程度の範囲と中ブロックと南ブロックの境界付近で高い値を示した。1月10日の結果では、中ブロックの中央に等高線に垂直に高い値を示すラインが認められた。北ブロックの北端の計測点のライン上で大きな値を示した。南ブロックは値の大ききにばらつきが見られず、全体的に高い傾向を示した。異なる計測日の結果を比較すると、全体的に計測結果に大きな差が見られなかった。しかし、例えば、図3のa、b、c、d地点のように計測日によって値が大きく異なり、明瞭に地下水音が確認できる、 $7.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ 以上の加速度の値を示す場合とほとんど地下水音が検知できない、 $3.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ 以下の加速度の値を示す場合が認められた。また、特定の計測日の結果が大きくなる傾向も見られなかった。本研究の対象斜面の土壌には粒径の大きな礫が多く含まれているために、センサ面と土壌の接触が不十分であったことが計測日の違いによる結果の差異につながったと考えられる。

12月20日、1月10日の計測結果で高い値を示した点を中心に2014年1月16－17日に測定を行った（図4）。中ブロック中央では等高線に直行する方向に加速度の値が $6.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ を超えるラインが存在した。2014年1月10日の計測結果とよく似ており、直線状に地下水が存在していると考えられた。北ブロックの北端では値の強弱はあるものの、加速度の値が $5.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ を超える地点が直線状に存在していることから、地下水流動の可能性が推測された。また、南ブロックでは計測した全地点で加速度の値が $5.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ より高く、地下水の存在が推測された。

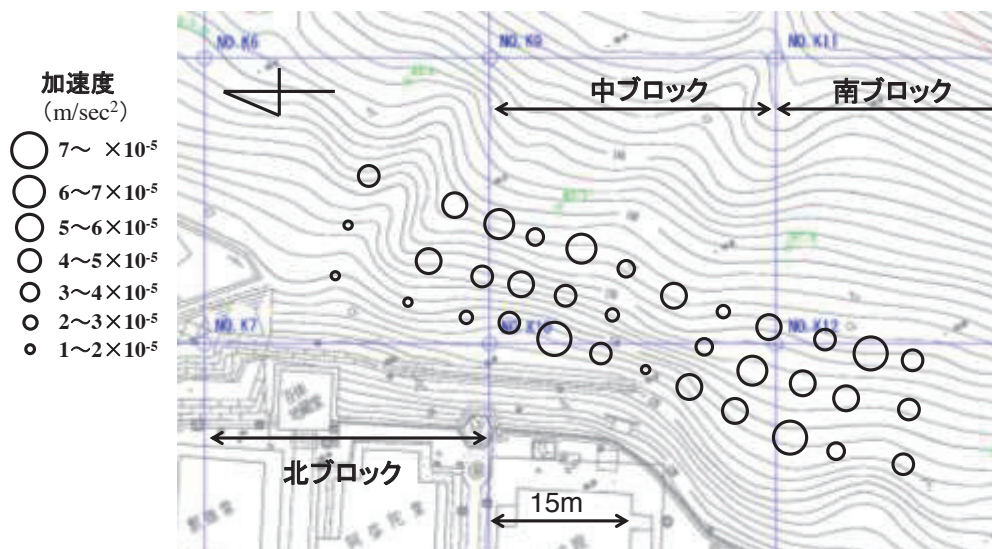


図2 2013年12月20日における地中音測定の結果

- 加速度
(m/sec^2)
- $7 \sim \times 10^{-5}$
 - $6 \sim 7 \times 10^{-5}$
 - $5 \sim 6 \times 10^{-5}$
 - $4 \sim 5 \times 10^{-5}$
 - $3 \sim 4 \times 10^{-5}$
 - $2 \sim 3 \times 10^{-5}$
 - $1 \sim 2 \times 10^{-5}$

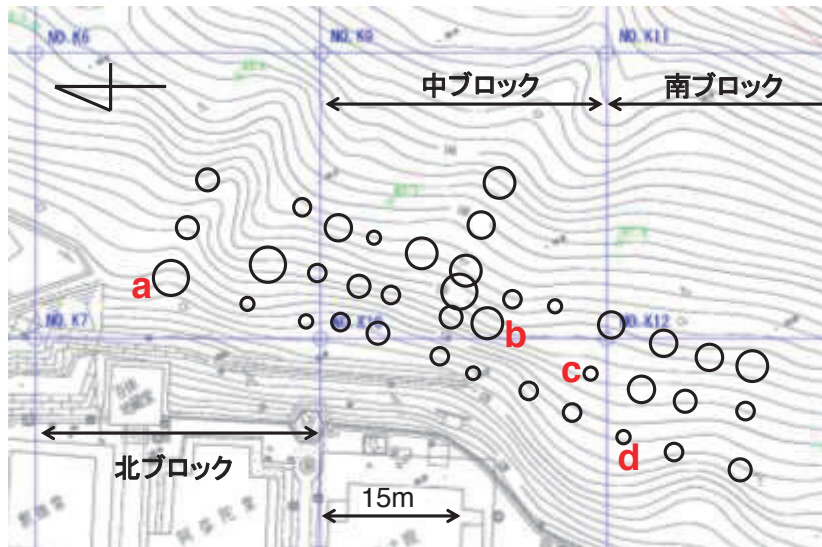


図3 2014年1月10日における地中音測定の結果

- 加速度
(m/sec^2)
- $7 \sim \times 10^{-5}$
 - $6 \sim 7 \times 10^{-5}$
 - $5 \sim 6 \times 10^{-5}$
 - $4 \sim 5 \times 10^{-5}$
 - $3 \sim 4 \times 10^{-5}$
 - $2 \sim 3 \times 10^{-5}$
 - $1 \sim 2 \times 10^{-5}$

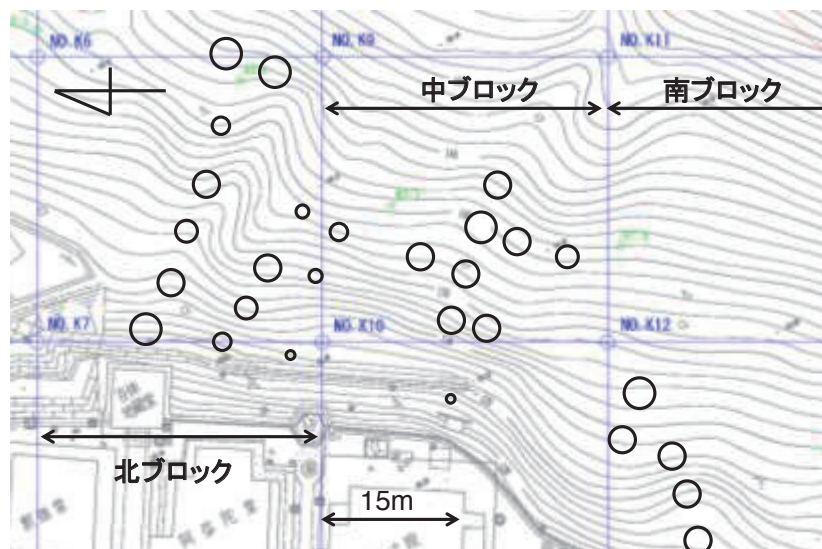


図4 2014年1月16-17日における地中音測定の結果

- 加速度
(m/sec^2)
- $7 \sim \times 10^{-5}$
 - $6 \sim 7 \times 10^{-5}$
 - $5 \sim 6 \times 10^{-5}$
 - $4 \sim 5 \times 10^{-5}$
 - $3 \sim 4 \times 10^{-5}$
 - $2 \sim 3 \times 10^{-5}$
 - $1 \sim 2 \times 10^{-5}$

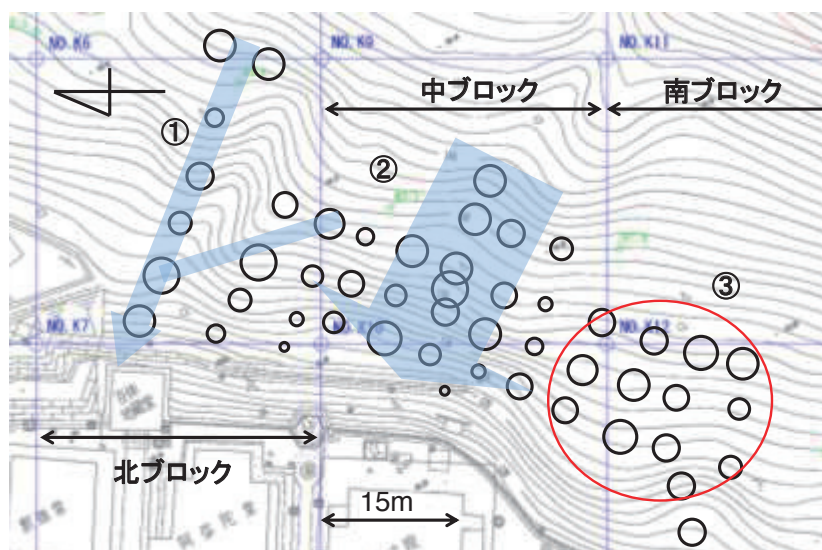


図5 地中音測定結果（各計測点の最大値）と推定された水みちと地下水帯の分布

本研究の計測は3回に分けて行われたが、計測日前の降水量に大きな差は見られず、計測日にかかわらず地盤内の水分状況にも大きな差が見られないと考えられる。また、計測日によって結果に差異があるとき、センサ面と土壌の接触が不十分であるために計測結果の値は小さくなることが原因であると考えられる。このため、複数の計測日の結果を比較する場合、計測点での最大値を用いることで地下水の存在を推定することが可能となる。図5に各計測点の結果の最大値を示した。計測結果の最大値を用いた場合、図5中の①、②に示す水みちが推定された。中ブロックでは幅10–15m程度の水みちがあると考えられる。また、斜面末端では値が小さくなる傾向があることから、流動した地下水が深部に浸透したために、地中音測定では地下水の存在を捉えられない可能性が挙げられる。図5中の③赤丸で示した南ブロックでは全体的に値が高い傾向にあり、水みちという特定の流路ではなく広い面積で地下水帯が存在していると考えられる。

(2) 間隙水圧値による水みちの検証

図6にB、P1、M、P2地点の土層－基盤境界面の間隙水圧値を示した。地中音測定の結果と比較するために、2013年12月20日から2014年1月15日の結果を示した。全地点で降雨に対して間隙水圧は鋭敏な反応を示し、正圧に達する傾向が認められた。この結果から、無降雨時には土層内は不飽和であるが、降雨中・降雨後には一時的に地下水帯が形成されることが示された。2014年1月10日は全地点が不飽和であるが、地中音測定の結果では全地点で地下水音（加速度）の値が $5.0 \times 10^{-5} \text{m/sec}^2$ より大きく、地下水流動が推定された。地中音測定の計測適応範囲は深度5m程度であるので、土層65cm～2mの範囲には恒常的な地下水帯はなく、少なくとも深さ方向2mから5mの範囲に地下水の流れがあることが推察される。土層内の間隙水圧の計測結果を考慮すると、本研究において地中音測定から得られた水みち、地下水帯は土層中ではなく比較的浅い深度の基岩中の地下水であると考えられる。

(3) 1m深地温結果との比較

これまで対象斜面では1m深地温測定によって水みちの推定がなされてきた。図7に対象斜面で行われた仲矢ら⁷⁾の結果を引用した。この結果は2012年2月に行われた測定の結果である。同一の計測範囲を比較すると仲矢ら⁷⁾が推定したI、II、III(図7)の水みちは地中音測定から得られた図5の①、②の水みちとよく似た結果となった。また、地中音測定で得られた図5中の②の水みちは1m深地温の結果の中～高温度帯と一致している傾向も認められ、基岩内の地下水の状態が地表面下1mの地温、地中音に反映されている可能性が認められた。一方、1m深地温で得られた図7のIVの水みちは地中音測定の結果では特定の水みちではなく、面的に広がる地下水帯(図5中の③)として判断された。このため、地中音測定法と1m深地温測定法によって推定された地下水流動の差異について今後検証する必要がある。

4. おわりに

本研究では地中音測定法を用いて清水寺後背斜面の地下水流動の把握を行った。その結果、斜面内に選択

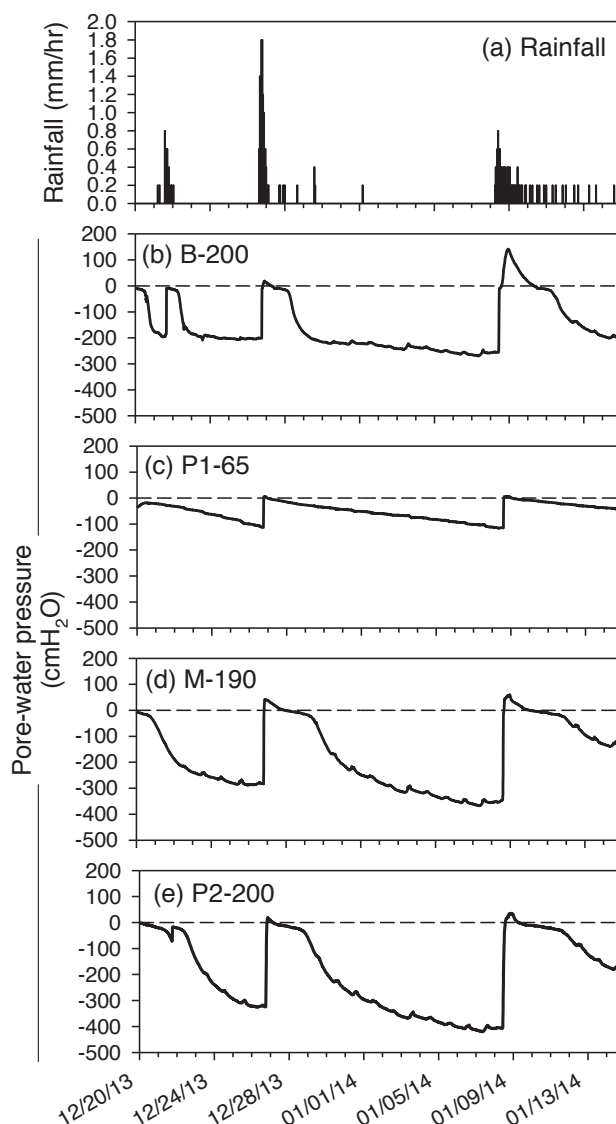


図6 B、P1、M、P2 地点における間隙水圧の変動

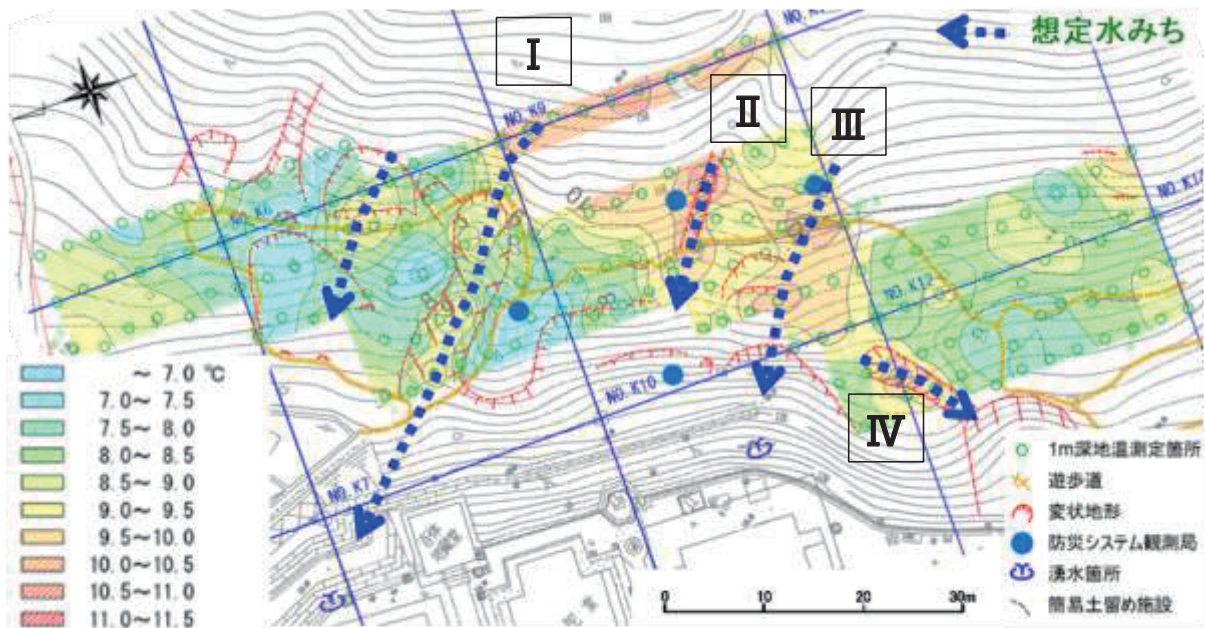


図7 1m深地温測定によって想定された水みち（仲矢ら⁷⁾ から引用・加筆）

的な水みちと地下水帯が分布することが認められた。土層内の間隙水圧の計測結果と比較した結果、推定された水みちは土層より深い基岩内の地下水流動であることが示唆された。また、本研究によって推定された水みちは1m深地温測定によって推定された水みちとよく似ており、地盤内の地下水流動が明確化されたと考えられる。しかし、手法によって推定される地下水流動に差異が認められる範囲があり、今後の詳細な検証が必要とされた。

謝辞：本研究を迫行するに当たり、森林総合研究所関西支所の多田泰之様には現地での計測方法やデータの取り扱いについてご指導・ご協力いただいた。ここに記して深く感謝を表します。

参考文献

- 1) 多田康之・奥村武信・久保田哲也：パイプの存在が斜面安定に与える影響の実験的検討，砂防学会誌，Vol. 55，No.3，pp.12-20，2002.
- 2) 堤大三・岩寄俊彦・藤田正治・SIDLE Roy C：パイプ流に関する数値・計算モデルと人工斜面実験による検証，砂防学会誌，Vol.58，No.1，pp.20-30，2004.
- 3) 多田康之・藤田正治・堤大三・小山敢・落合隆行・奥村武信・本田尚正：地中水みちと崩壊発生位置の関連性，砂防学会誌，Vol.60，No.4，pp.25-33，2007.
- 4) 酒匂一成・深川良一・岩崎賢一・里見知昭・安川郁夫：降雨時の斜面防災防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング，地盤工学ジャーナル，Vol.1，No.3，pp.57-69，2006.
- 5) 酒匂一成・里見知昭・菅野智之・安川郁夫・深川良一：降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの確立に関する研究，歴史都市防災論文集，Vol.1，pp.167-17，2007.
- 6) 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.
- 7) 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.