

地下流水音による地中水みち経路の推定

DETECTION OF UNDERGROUND WATER PATHWAYS BY UNDERGROUND HYDROSONIC METHOD

多田泰之¹・藤田正治²・堤 大三³・小山 敢⁴・河合隆行⁵

Yasuyuki TADA, Masaharu FUJITA, Daizo TSUTSUMI, Kan KOYAMA and Takayuki KAWAI

¹正会員 農博 京都大学研究員 防災研究所流域災害研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所流域災害研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³正会員 農博 京都大学助手 防災研究所流域災害研究センター (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴農修 鳥取県林業試験場研究員 森林管理研究室 (〒680-1203 鳥取市河原町113)

⁵理修 鳥取大学大学院博士課程 乾燥地研究センター乾地環境部門 (〒680-0001 鳥取市浜坂1390)

In this study, a new method to detect the underground water path positions was developed. Water path position was estimated by the sound of ground water flow. As a first step, water flow through a single water pathway installed within an isotropic model soil layer was examined by this method. From the measured sound pressure, position of sound source was estimated. Results indicated that the estimated position of sound source corresponded to location of the installed actual water pathway. As a next step, this method was also applied both to natural hillslopes and road cut slopes. Water springs from lower part of every slope were observed, and the relationship between estimated water pathway within the slopes and the position of these springs were examined. Results indicated that the estimated water pathways were corresponded to springs position with accuracy of 0.5 m or less. From these results, it is obvious that we can detect underground water pathways with high accuracy using this new method.

Key Words : water path position, underground sound pressure, spring position

1. はじめに

崩壊が「いつ」・「どこで」発生するかを予測することは、土砂災害の多いわが国において重要な課題である。そのため、崩壊の時刻・発生位置を予測する様々な手法が提案されてきた^{1), 2), 3)}が、現状では必ずしも高い予測精度は得られていない¹⁾。

一方、①崩壊地の多くで湧水やその痕跡が観察されること^{4), 5)}、②崩壊の前兆現象として湧水の噴出・停止が経験的に知られていることなどから、水みちなどの不均一要素を適切に評価できれば、崩壊発生の予測精度が向上すると考えられている⁶⁾。

このような背景から、水みちの雨水流出過程^{7), 8), 9)}や崩壊発生機構¹⁰⁾に及ぼす影響などが検討され、多くの興味深い知見が得られている。しかし、現状での崩壊と水みちについての知見はあるシナリオに基づく推測で、両者の因果関係を現地で明確に説明したものは数少ない。この原因は①崩壊が突発的に発生する現象で、その発生位置を特定するのが困難であること、②足元が不安定で重い機材を用いた調査が実施しにくい山地において、水みちの位置を簡便に調べる手法が無いことが大きく影響

している。崩壊と水みちの因果関係を明らかにするためには、まず、山地において簡便に実施できる水みち位置の調査方法を開発する必要がある。

そこで、本研究では崩壊と水みちの因果関係を明らかにするための第一段階として、山地において簡便に実施できる水みち位置の調査方法を考案したので報告する。すなわち、水みち中を流れる水流の発する音から水みちの位置を特定する方法について検討する。

2. 地下流水音と測定装置

ここでは、水みち中を流れる水流の発する音を地下流水音と呼ぶ。地下流水音は水流の発する音のみではなく、その他の雑音も含む(風音、風の振動音、土・礫の摩擦音等)。しかし、測定を工夫することで雑音を抑え、地下水流の音を聴くことができる。以下、測定装置の仕組みについて説明する。

地下流水音測定装置を写真-1に、測定の模式を図-1に示した。この装置は従来水道管の漏水箇所を検知するために開発されたもので、その分野では漏水検知器と呼ばれている。

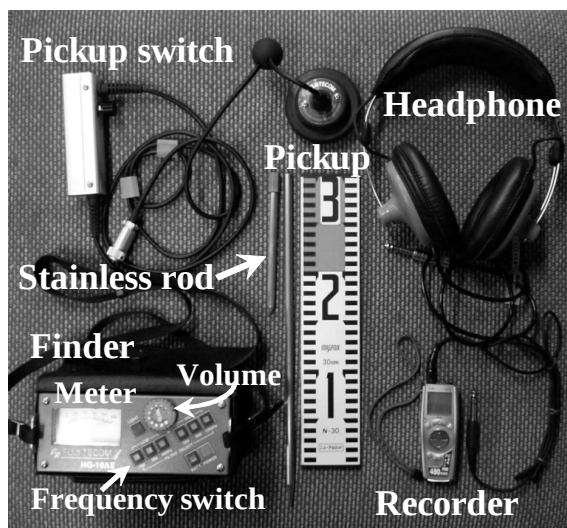


写真-1 地下流水音測定装置

地下流水音測定装置は、1) ピックアップ、2) 測定部、3) ヘッドホン、4) 録音部で構成されている。各部の機能は次の通りである。

- 1) ピックアップ : 風等の雑音を防ぐために、写真-1に示した $\phi 0.8 \times 10 \text{ cm}$ のステンレス棒をピックアップへ取り付け、これを地表面へ挿入し地下流水音を捉える。
- 2) 測定部 : ピックアップで捉えた地下流水音を増幅する増幅回路、風等の雑音を遮断するフィルター回路、地下流水音の音圧を指示するレベルメータからなる。フィルター回路はピックアップで捕らえた流水音のうち特定の周波数帯の音のみを取り出せ、野外で発生する雑音に柔軟に対応できる。また、レベルメータによって、音の強弱を視覚的に判断できる。
- 3) ヘッドホン : 増幅率、周波数帯が調整された地下流水音をリアルタイムで出力する。

- 4) レコーダー : 一般に市販されているボイスレコーダーをヘッドホンと並列に繋ぎ、地下流水音を録音する。
- 地下流水音測定装置は、0.9kgと非常に軽量であるだけでなく、最も大きい測定部のサイズは $17.5 \times 7.0 \times 10.5 \text{ cm}$ と小型で、山地の作業に十分利用できる。

3. 模型実験

均一な土層に水みちが1つ存在する場合の地下流水音の特徴を検討するために、次の模型実験を行った。

(1) 実験方法

模型土層を図-2に示した。模型土層は、長さ5m、幅2m、深さ0.7mの土槽に標準砂を入れ散水・転圧したも

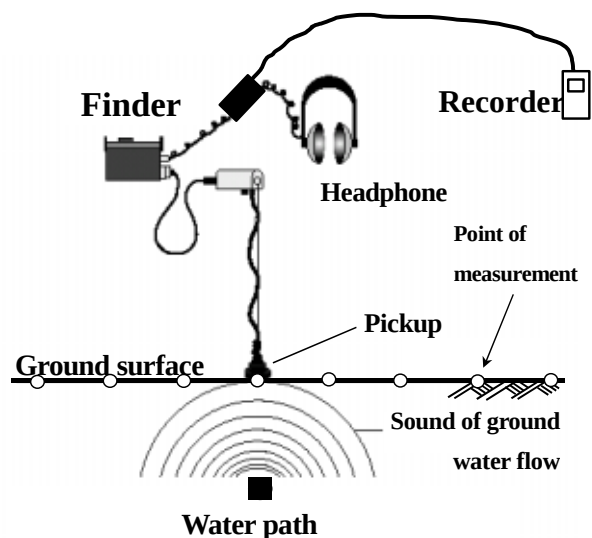


図-1 地下流水音の測定

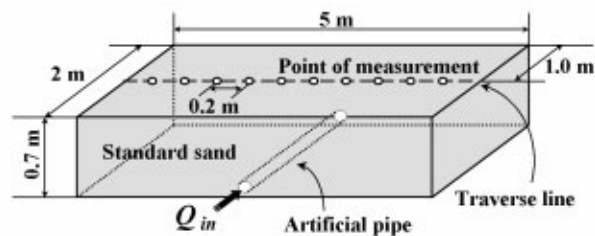


図-2 模型土層

のとした。土層の乾燥密度は 1.43 g/cm^3 となった。この模型土層の中央2.5mの位置に、模擬パイプを設置した。模擬パイプは、多田ら¹⁰⁾を参考に、直径5cmの塩化ビニル管に $\phi = 0.8 \text{ cm}$ の孔を 0.7 個/cm^3 の密度になるよう穿孔し、砂粒子が流入しないよう不織布で被覆した。給水は図-2の Q_{in} から行った。なお、土層を通過した水の排水音が実験場に伝達しないよう、土層から約10m離れた地点に導水した。

実験条件は、パイプの深さと流量を変えて行った。すなわち、深さは0.35、0.62mの2ケース、流量は50、100、150、200、250、300 cm^3/s の6種類の定常給水とした。

地下流水音は図-2に示したように、土層中央の地表面に測線を設け、パイプ直上から左右へ2m測定した。測定間隔は0.2mとした。

地下流水音圧は、各測点でピックアップに取り付けたステンレス棒を地表面へ挿し込んだ後、ヘッドホンから聞こえる地下流水音の変動とレベルメータの指示値の変動の関係を良く観察し、ピーク値を10回測定した。そして、それらの値の平均値を地下流水音圧とした。なお、予備実験の結果、地下流水音は100～600Hzの間でよく捉えることが可能であった。本実験では地下流水音のうち、この周波数帯のものを測定値としている。

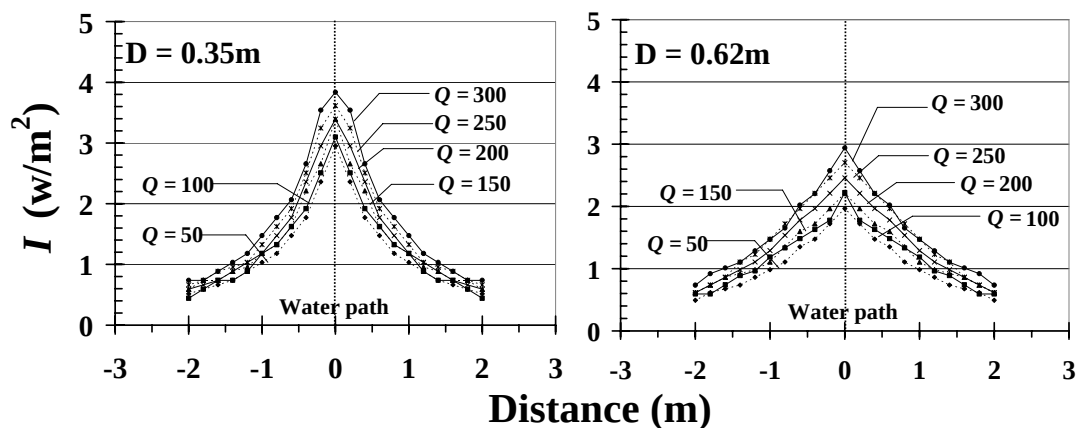


図-3 深度毎の地下流水音の測定結果

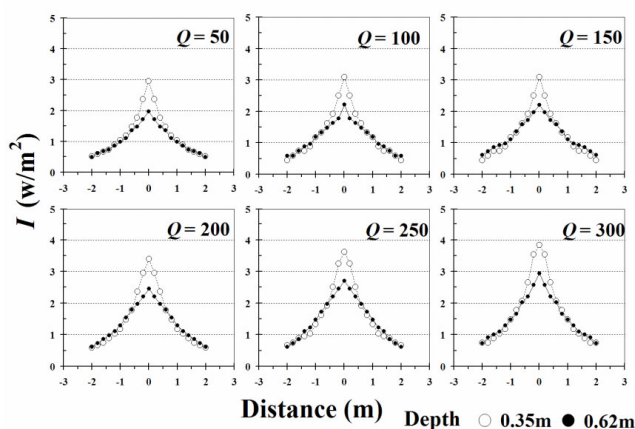


図-4 流量毎の地下流水音の測定結果

(2) 地表面で測定した地下流水音の特徴

各測点で測定した地下流水音圧 I (W/m^2) をパイプの深さ別に図-3に、流量別に図-4に示した。なお、図中の数字は流量 (cm^3/s) を表す。また、図中ではパイプの位置を0mとして表記している。図より次のことが読み取れる。

- 1) 地表面で測定した地下流水音圧は、パイプ直上0mの位置で最も強く、音源であるパイプから離れるほど音圧が減衰する（図-3, 4）。
- 2) パイプの深さが等しい場合（図-3）、各深度の地下流水音の分布波形の勾配は類似しているが、流量が多いほど各測点での地下流水音が強い。
- 3) パイプ流量が等しい場合（図-4）、深度が浅い方が音源であるパイプ近傍の音圧が高い。また、分布波形の勾配は深度が深い場合に比較し、深度が浅い方が急である。

これらの結果から次の知見を得る。

- 1) 地下流水音は水みちの直上で最も強く、水みちから離れるほど弱くなる。
- 2) 水みちの深さが等しければ、流量が多いほど地下流

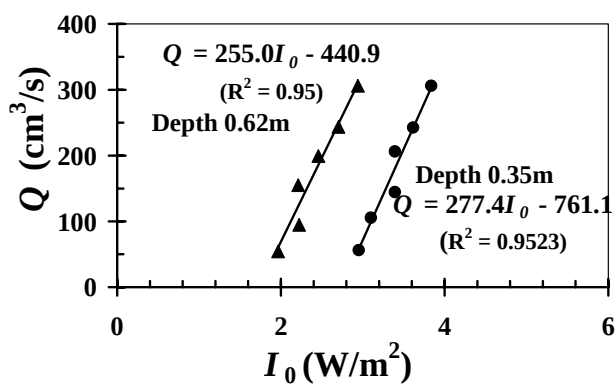


図-5 I_0 と流量の関係

水音圧のピークは大きい。

- 3) 水みちの流量が等しければ、水みちが浅い方が地下流水音圧のピークは大きい。
- 4) 地表面へ伝わる地下流水音の大きさは、水みちの流量と深さの両者の関係によって定まる。

これらの地下流水音の特徴は、地下流水音の距離減衰によって生じるものと考えられる。今後、音の距離減衰式をもととした理論展開をすることで、音源の深度を特定できる可能性がある。

(3) 地下流水音と流量の関係

現地で水みちの調査を行う場合、まず知りたいのはその位置であるが、次に知りたいのはその流量である。ここでは地下流水音圧 I と流量の関係について検討しておく。

パイプ直上の地表面で測定された地下流水音圧 I_0 と流量の関係をパイプの深さ毎に図-5に示した。

地下流水音圧 I_0 と流量の間には強い正の相関関係が存在し、何れの深度も直線で近似できた。 I_0 は音源の深さに影響を受けるので、 I_0 から流量を求める場合には、音源の深さが既知である必要があるが、既知の場合には地下流水音のピーク音圧から流量も推定できる可能性が

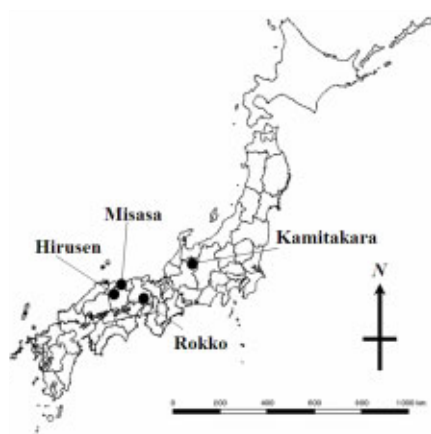


図-6 調査地

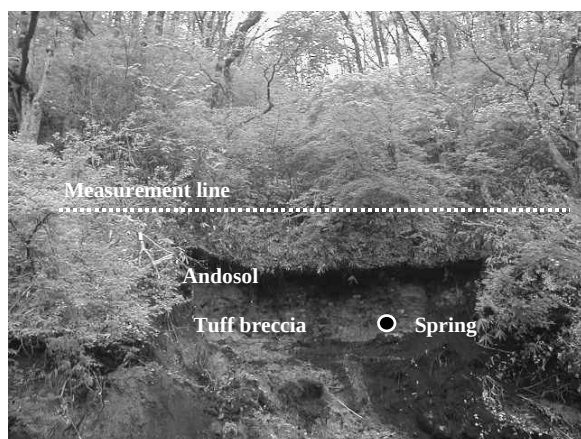


写真-2 蒜山Aの林道切土面の状態

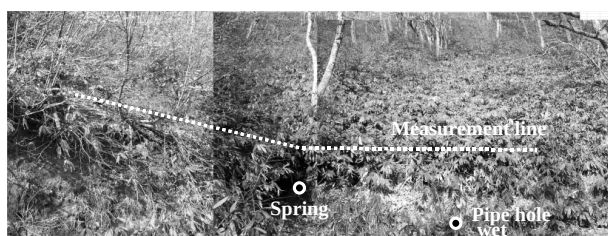


写真-3 蒜山Bの林道切土面の状態

ある。この点は今後の課題としたい。

4. 本手法の現地への適用

(1) 調査地の概要

均一な土層に水みちが1つだけ存在する場合、地下流水音の最も強い位置の真下に水みちが存在することが分かった。しかし、土層が不均一な自然斜面において同様の結果が得られるかは不明である。そこで、本章では本手法を現地へ適用し、地下流水音によって水みち位置を推定できるか検討する。

本手法が地質や地盤の密度の違いによらず、どのよう

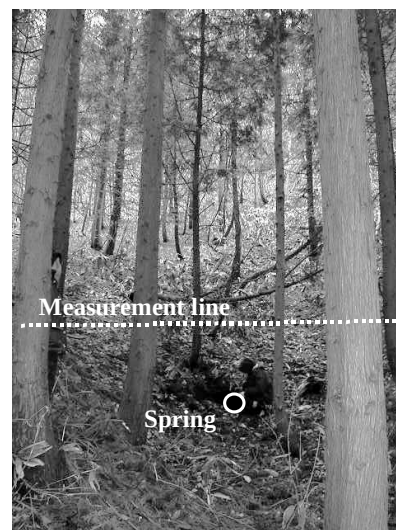


写真-4 蒜山Cの湧水点付近の様子

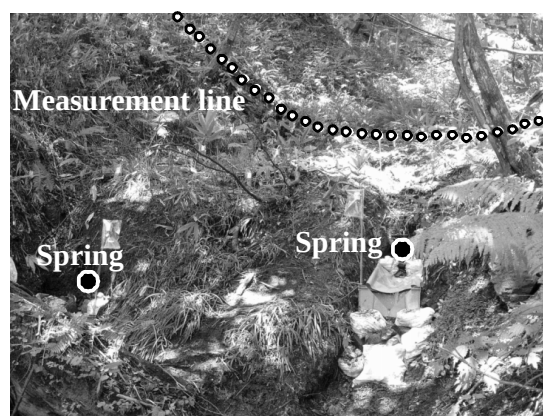


写真-5 ヒル谷の湧水点付近の様子

な場所でも探査できるかを検討するため、調査は地質の異なる鳥取大学蒜山・三朝演習林、六甲山、岐阜県上宝村に位置するヒル谷で行った(図-6)。各調査地の概要は次の通りである。

- 1) 蒜山A(写真-2)；林道切土面に見られる湧水を対象に探査を実施した。表層は大山から供給された黒色火山灰土が0.5m程度堆積し、その下層は凝灰角礫岩よりなる。湧水は凝灰角礫岩層に存在し、豪雨時または融雪時に水流が存在する。探査時には、少量の湧水が存在した。
- 2) 蒜山B(写真-3)；林道切土面に見られた2つの湧水点を対象に探査を実施した。表層は黒色火山灰土が1.5m程度堆積し、その下層は凝灰角礫岩よりなる。湧水Aは黒色火山灰土層に存在し、探査時には極めて少量の流出が見られた。湧水Bは凝灰角礫岩層に存在し、探査時には流出はなかった。
- 3) 蒜山C(写真-4)；山脚に発達した湧水を対象に探査を実施した。表層は黒色火山灰土が2m程度堆積し、その下層は凝灰角礫岩よりなる。湧水は黒色火山灰

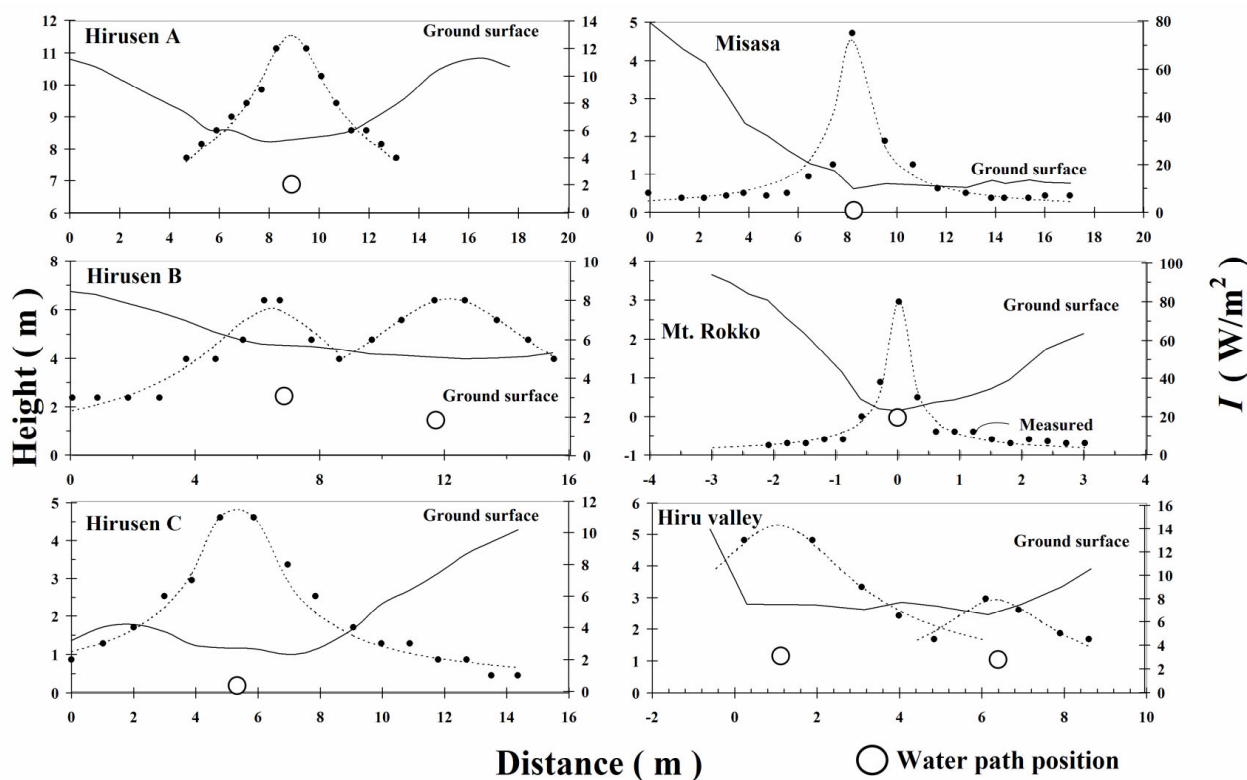


図-7 湧水点の位置と地下流水音の測定結果

土層に存在し、豪雨時または融雪時に湧水が存在する。探査時には湧水はなく、湿り程度であった。

- 4) 三朝；山脚に発達した湧水を対象に探査を実施した。地質は花崗岩よりなる。湧水は豪雨時と融雪時に存在し、探査時には比較的豊富な湧水の流出が見られた。
- 5) 六甲山；谷の末端の崩積土に見られた湧水点で探査を実施した。地質は花崗岩よりなる。湧水は年間を通じて存在し、探査時にも多量の湧水が存在した。
- 6) ヒル谷（写真-5）；ヒル谷源頭部に位置する0次谷の崩積土中に発達した2つの湧水点を対象に探査を実施した。地質は花崗斑岩よりなり、夏期の乾燥時には湧水は存在しない。探査時には、少量の湧水が存在した。

(2) 水みちの探査方法

調査は、次の手順で行った。

- 1) 写真2～5中の破線で示したように水みちを横切る測線を設置する。
- 2) 測線上に0.5～2m間隔で測点を設ける。
- 3) 測点と水みち位置を測量する。
- 4) 各測点で地下流水音を測定する。なお、測定方法は前述の通りであるが、現地においては、風などが突発的に吹くため、そのような雑音が多いときは、地

下流水音の測定は行わないよう留意した。しかし、現地では無風であることは少ないため、予備実験で確認した風の影響が少ない周波数帯400～1200Hzで地下流水音を測定した。

(3) 探査結果

各調査地で実施した地下流水音の測定結果を図-7に示した。なお、図中X軸は距離(m)を、左側のY軸は比高(m)を表し、実線は地表面を、○は湧水点の位置を意味する。また、図中の右側のY軸は地下流水音圧(W/m²)で、各測点で測定した地下流水音圧を●で、その分布を破線で表した。

何れの調査地においても湧水点直上で地下流水音が最も強く、湧水点から離れるほど地下流水音は弱くなる。また、この傾向は、湧水点が複数存在する場合も同様である（蒜山B、ヒル谷）。また、各調査地で流量が異なるので一概に比較することは難しいが、湧水点が比較的深い蒜山A、B、ヒル谷に比較し、湧水点が地表面から浅い位置に存在する六甲や三朝では地下流水音の波形分布の勾配が急である。これらの結果は、模型実験で確認された結果と合致する。なお、目視で湧水が確認されない場所（蒜山B、C）においても、音圧ピークが存在するのは興味深い。

次に、各調査地の湧水点と地下流水音のピークのX座

表-1 湧水点の位置と地下流水音ピークの位置の対応

	Measured X (m)	Estimated X (m)	Deflection Dx (m)
Hirusen A	8.90	8.90	0.00
Hirusen B	6.89	6.41	0.48
	11.76	12.13	-0.36
Hirusen C	5.33	5.33	0.00
Misasa	8.25	8.25	0.00
Rokko	0.00	0.00	0.00
Hiru Valley	1.13	1.13	0.00
	6.40	6.40	0.00

標、及び、それらの偏差(Dx)を表-1にまとめた。X軸方向に最大の偏差が認められるのは、蒜山Bで0.48mの偏差が生じている。一方、他の調査地では湧水点と地下流水音のピークの位置は合致し、地下流水音分布から湧水点の位置がよく推定できている。これらより、地下流水音探査によって水みち位置は0.5m程度の精度で特定できるといえる。

5. まとめ

地下を流れる水流の発する音から水みちの位置を特定する手法について検討した。結果は次のようにまとめられる。

- 1) 地下流水音によって水みちの位置を特定できる。
- 2) 水みちを横切る方向に測線を決め、任意の間隔で地下流水音を測定する。このとき、水みちは地下流水音圧のピーク直下に存在する。なお、現地では最大0.5m程度の偏差が生じる場合があった。
- 3) 肉眼で湧水を確認できない時でも実施可能である。
- 4) 地下流水音探知装置は小型・軽量であり、山地で十分利用できる。
- 5) 現地での流量の把握が困難であったため実験でしか確認していないが、水みち直上で測定した地下流水音圧 I_0 と流量には正の相関が認められた。水みちの流量を地下流水音圧で推定できる可能性がある。

従来、水の流れる部位を簡便に調査する手法がないために調査点の選定などは目視や経験による場合が多くあった。4.で述べた蒜山Bやヒル谷では、谷の最も深い場所で必ずしも水が流れているわけではなく、こうした場所で地下水の変動などを観測した場合、実際とは異なる結果を得ることは容易に想像される。また、実務においても斜面の掘削を行った際、突然湧水が発生し事故につながる場合もある。本手法は現地で水みち位置を簡便に特定できるので、前述のような地下水の湧出に関連する様々な問題への応用が期待される。なお、測定時間や

現地での使いやすさなどについては議論しなかったが、筆者は実際にこの方法を用いて山地斜面を調査し、①非常に軽量で疲労度は低いこと。②地下流水音の測定は短時間で行えることを実感している。

今回の検討では土層の構成材料や密度等の不均一性による地下流水音の差異については全く無視している。本来これらは考慮されるべきである。今後の検討課題としたい。

謝辞:本研究は京都大学防災研究所 COE プログラムの一部として実施し、予算を使用した。本調査・実験を実施するにあたり京都大学農学部 小杉 賢一朗助手、鳥取大学農学部 奥村 武信教授、本田 尚正講師、土屋竜太氏、九州大学農学研究 久保田 哲也助教授より多大なご助言・ご助力を頂きました。記して謝辞とします。

参考文献

- 1) 平松晋也、水山高久、石川芳治：水の浸透流過程を考慮した表層崩壊予測手法に関する研究、砂防学会誌、Vol.43, No.1, pp.5-15, 1990.
- 2) 三森利明：軸対象座標を用いた準3次元崩壊解析法の研究、砂防学会誌、Vol.48, No.2, pp.4-11, 1995.
- 3) 小川紀一郎：山地斜面における表層土の構造特性と水分変動過程に関する研究、北海道大学農学部演習林研究報告、Vol.54, No.1, pp.87-141, 1997.
- 4) 川口武雄、渡辺隆司、瀧口喜代志：赤城山山崩れに関する研究、林試研報、No. 49, pp.11-78, 1951.
- 5) 太田猛彦、塚本良則、野口晴彦：パイプフローと山崩れについての一考察、昭和56年度砂防学会研究発表会概要集、pp.92-93, 1981.
- 6) 水山高久研究代表：山腹斜面のパイプフローが表層崩壊発生に与える影響に関する研究、文部科学省科学研究費報告書、33pp., 1994.
- 7) 北原 曜、清水 晃、真鍋征夫：林地緩斜面土層中のパイプフローの特性、日林誌、Vol.70, No. 7, pp.318-323, 1988.
- 8) 内田太郎、小杉賢一郎、大手信人、水山高久：斜面土層内のパイプが地下水面形に及ぼす影響に関する実験的研究、日本林学会誌論文集、No.106, pp.505-508, 1995.
- 9) 小山 敢、奥村武信：1 降雨に対して 2 回の流量増加があるパイプ流の流出機構、地形、Vol.23, No. 4, pp.561-584, 2002.
- 10) 多田泰之、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.

(2005.9.30受付)