

山の地下に眠る “宝の水”の利用を目指す

土砂災害の軽減にも貢献する新しい水資源

「動かざること山のごとし」といわれてきた。ところが昨年8月の広島市の大規模な土石流など、近年豪雨による山の災害が多発するようになった。豪雨は地球温暖化の影響と見られるが、目に見えない山の中の構造を明らかにできれば、山体崩壊や土砂災害への備えも可能になる。さらに地下に眠る安全な水資源の探索、開発、利用にもつながる。ユニークな研究に着手した京都大学の小杉賢一朗准教授のグループのチャレンジに同行した。

岩の中にしみ込む 大量の水を発見

豊かな森林を育む土壌が水を蓄える様子は、「緑のダム」と呼ばれている。その土壌を拡大してみると、土の粒子の間には多くの隙間があることがわかる。スポンジに水がしみ込むように、この土壌内の隙間に大量の水が蓄えられているのだ。その下の地盤は岩石からなり、「基岩」と呼ばれる（p.4下）。

「基岩の上に枯葉などが堆積し、透水性や保水性の良い森林土壌が形成されることで、水持ちが良くなります。洪水などの防止にもつながっているといわれてきましたが、どうも表層の土壌だけでは水持ちの良さを説明できないことがわかってきました」と小杉さんはいふ。

兵庫県神戸市の六甲山と滋賀県大津市の田上山^{たなかみやま}の2カ所で、雨が降ったときに流れ出る水の量を調査した（p.5上）。この2つの山はどちらも森林土壌の厚さが1.5メートルほどで、保水性や透水性もよく似ている。地理的にも近いので、雨の降り方もほぼ同じと見て良い。

ただ地形が大きく異なり、六甲山は急勾配で、田上山はなだらかな丘陵になっている。土壌にしみ込んだ水は、基岩の上を斜面に沿って麓の方へ流れていく。水は急斜面では速く流れるし、緩やかな斜面ではゆっくりと流れるはずだ。

「土壌の条件が似ているので、勾配のきつい六甲山の方が、降った雨が一気に流れ下るのではないかと予想したところ、逆の観測結果となった。



葛川流域（滋賀県大津市、p.5左上）の調査地点で。調査ボーリングの跡の孔に塩ビ管を通し、山体地下水についてさまざまな調査をする。塩ビ管の地中側の先端部側面には穴があげられており、地下水水位が上がると塩ビ管内の水位も連動して上がる。地下水をサンプリングして水質を調べるほか、複数のボーリング孔や雨水のイオンの構成比などを比較することで、雨水や山体地下水の動きを解析できる。中央が小杉さん。

田上山から流れ出る川では、降雨の直後に流量が急増し、止むと急減した。一方の六甲山では、ある程度の雨でもすぐには流量が増えず、2～3カ月遅れて増えた。大規模な雨の場合だけ、降り終わった直後に流量がゆっくりと増減した。

「森林土壌は山全体からみると、表面を薄皮一枚が覆っているようなものです。そんな薄い層だけでは長期間にわたり水

を保てません。だからかなりの量の水が地下の岩の中にしみ込んでいるのではないかと考えるようになりました。」

山の地下に存在する水（山体地下水）がたまるには、森林土壌の役割も非常に重要だ。基岩の上に土壌がなければ、水はしみ込むことなく流れ下ってしまう。森林土壌が一時的に水を蓄えて岩にゆっくりと供給することで、しみ込む水の量を

増やしている。「土壌と基岩をあわせた山全体が水資源をゆっくりと蓄え、涵養しているのです」と両者の大切さを説く。

急勾配の山ほど貯水量が多い

山体地下水がどれくらいの量でどのように分布しているのか、これまで計測された例はない。小杉さんらは実態を探ろうと、まず山間部での降水量と流出量などから山体に蓄えられる水の量を計算してみた。水が少ない冬場を基準に、六甲山では多い時期に400ミリメートル程度貯水されるのに対して、田上山の貯水量はその半分程度と推定された。それを直に確かめるため、現地でボーリング調査をした。

「調査開始当初は、どこを掘るか決めるのに非常に迷いました」。地上からは見えないものを探そうというのだから当然だ。

「何度も現場を歩いて湧水の場所などを調べ、水脈の手がかりを探しました。すると、普段は水が全く流れていないにもかかわらず、谷になっている所があったのです。大雨の後にその場所へ行ってみると、わずかな期間だけ水が流れていました。大雨で地下水位が上昇して流れ出しているのではないかなどと想像をたくましくしながら、ボーリング調査の場所を決めていきました」。

小杉さんらは特異な谷の周辺など、細

かい間隔で何本もボーリングを打ち、それぞれの掘削孔に地下水位計を設置し、降雨時の地下水の変化を調べた。

掘り出した基岩のサンプル(p.6上)には、ところどころに亀裂が見られる。細いヒビだったり、隙間が大きく開いていたり、完全に砕けている箇所もある。一般に、岩というと水さえ寄せ付けられない強固な塊と思いがちだが、実は内部に隙間があり、そこに水がしみ込んでいるのだ。亀裂の数や大きさの解析結果と、降雨時の地下水位上昇のデータをあわせれば貯水量が計算できる。すべてのボーリング孔で測定、解析したところ、六甲山では多いときには300ミリメートル程度、田上山では60ミリメートル程度の水が蓄えられるという結果になった。

ここまで紹介してきた六甲山と田上山は、マグマがゆっくり冷えてできた花崗岩の山である。一方で、小杉さんらは滋賀県内で堆積岩(砂や泥が固まってできた岩)からなる山でも並行して調査を進めている。急勾配の山としては葛川地区(大津市)、丘陵として信楽地区(甲賀市)の流域を選んだ(p.5左上)。

災害の観点からみると花崗岩の山は、2014年の広島県の土砂災害のように上層の森林土壌だけが流れ出すことが多い。一方、堆積岩の山は、基岩もろとも山の一部が崩れる「深層崩壊」の危険性が高いといわれている(p.7上)。2011年9月

に高知県や岡山県を通過した台風12号によって深層崩壊が多発した紀伊山地は堆積岩でできている。

調査の結果、堆積岩の山でも急勾配の方が貯水量が多い傾向が見えてきた。

山体地下水の分布を探り、安全な水源を確保

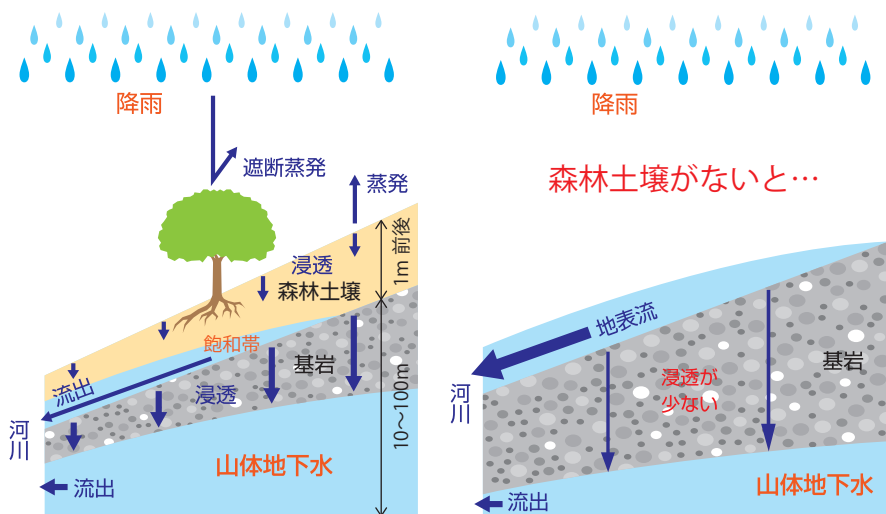
葛川地区は大津市の最北端、琵琶湖の西側に位置する。比良山系の谷あいがあり、琵琶湖へと流れる安曇川の源流域だ。安曇川は葛川地区を北へ向かって流れており、川の近くの山の斜面を調査地域に選んだ。ふもとの集落のすぐ後ろに急斜面があり、土砂災害の危険性も高い場所だ。京都大学農学部の研究室から車で1時間ほどの距離にある。この場所で、ボーリング調査などの結果をもとに山体地下水の効率的な取水方法についても研究を進めている。

葛川の調査地域には、水がわき出している所が何カ所もある。それらの湧水場所の分布を調べてみると、1本の線が見えてきた。地質構造と対応しているらしい。小杉さんは「岩の様子や地形を調べた結果、断層に沿って湧水がある」と推測した。断層は過去に地震などによって山が動いたときにできたひび割れだ。

「非常に強い圧力がかかって割れるので、断層部分では岩がすりつぶされて粘土ができます。その粘土によって地下水がさえぎられ、行き場を失った水が地上へとわき出しているのではないかと考えました」(p.6下)。

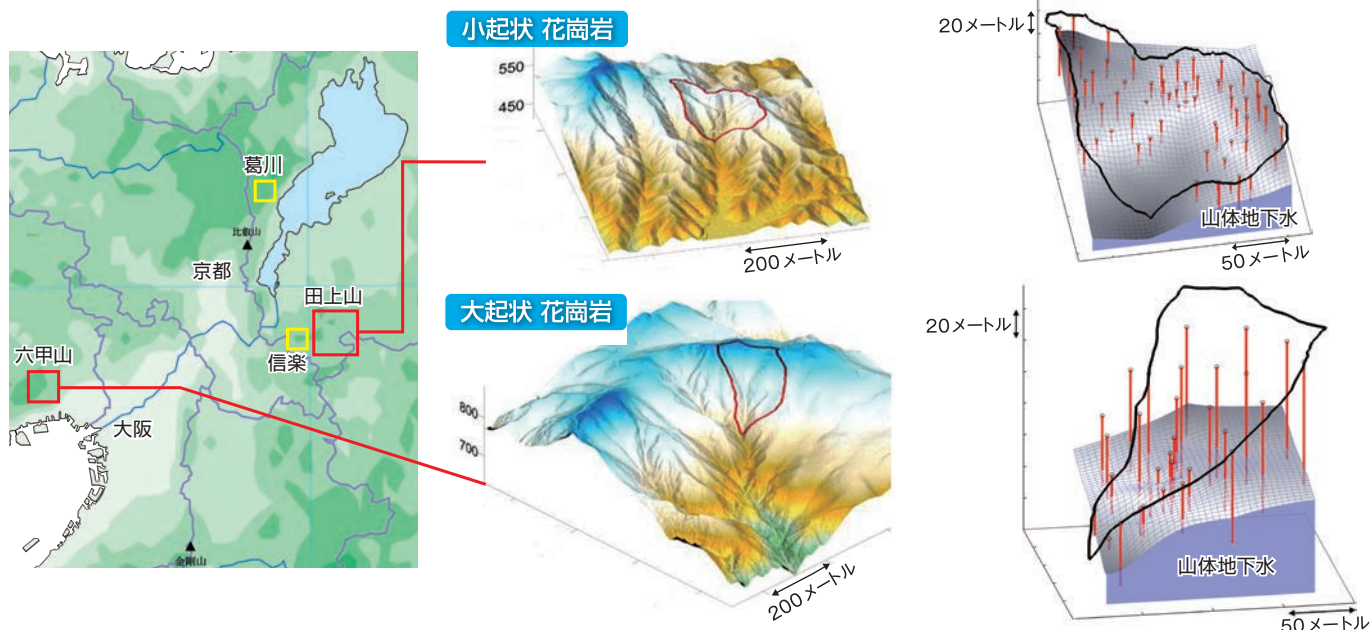
ボーリング調査は地下構造を直接知ることができるが、費用と手間がかかる。そこでボーリング調査に加えて「高密度電気探査」を併用して地下の構造を調べている。金属の棒をたくさん地表に刺して電極にし、地中に電流を流して比抵抗(電気の流れにくさ)を調べる方法だ。岩や土、水など地下にある物質によって電気の流れやすさや変化するため、比抵抗の変化から地下構造を推測する。「断層による粘土層があると予想していた場所で比抵抗が変化していたので、やはりそこで水がせき止められていると結論しました」。

小杉さんらはさらに、ヘリコプターを利



森林斜面での雨水の動きと森林土壌・基岩の役割

森林土壌では、土壌粒子や腐植などが集まって塊(団粒)を形成している。土壌粒子や団粒の間には隙間(孔隙)があり、空気や水分を保持している。蒸発せずに地表面に達した雨水は、森林土壌に浸透し、飽和すると湧水となって流れ出る。森林土壌は雨水を一時的に蓄え、ゆっくりと基岩に供給することで、基岩の亀裂に浸透する水の量を増やしている。基岩は雨水を山体地下水として長期的に蓄え、川にゆっくりと供給している。



左と中央の図はボーリング調査地点とその地形。六甲山地は花崗岩質で大起伏、田上山は花崗岩質で小起伏、信楽地区は堆積岩質で小起伏、葛川地域は堆積岩質で大起伏。右図の赤い縦線は、六甲山・田上山流域でのボーリング孔を示す。このような密度でのボーリング調査は世界にも例がない。ボーリング孔には水位計を取り付け、地下水面の分布を調査した。地下の構造や山体地下水の蓄えられ方、山体地下水同士のつながりなどを探る手がかりとなる。

用して空中から人工的に弱い電磁波を当てて地盤の電気抵抗を調べ、地下構造を探る「空中電磁探査」も試している。精度は大幅に落ちるものの、数十ヘクタール規模の広範囲を効率的に調べることができる。「地下水がありそうな候補地に見当をつけ、水資源の分布域を把握し、開発につなげることができます。空中電磁探査とボーリング調査や高密度電気探査の結果などを照らし合わせることで、精度を高めています」。

水を汲む井戸は、平地であれば縦に穴を掘って、ポンプなどでくみ上げる。しかし葛川の調査地域のように粘土によってせき止められた地下水は、横方向に穴を掘れば、水が溢れ出てくる (p.7右下)。「水をくみ上げるためのエネルギーを使わずにすみ、非常に効率的です」という。

葛川地区では、山体地下水の水質の調査も並行して進めている。湧水は通常、大腸菌は検出されないものの、大雨の後には検出されることもある。シカなどの糞に含まれる大腸菌などが溶け出して汚染されるためだ。一方、ボーリングによって取り出した山体地下水では、湧水で菌が検出されたのと同じ日でも大腸菌は検出されなかった。「現在、追跡調査中で

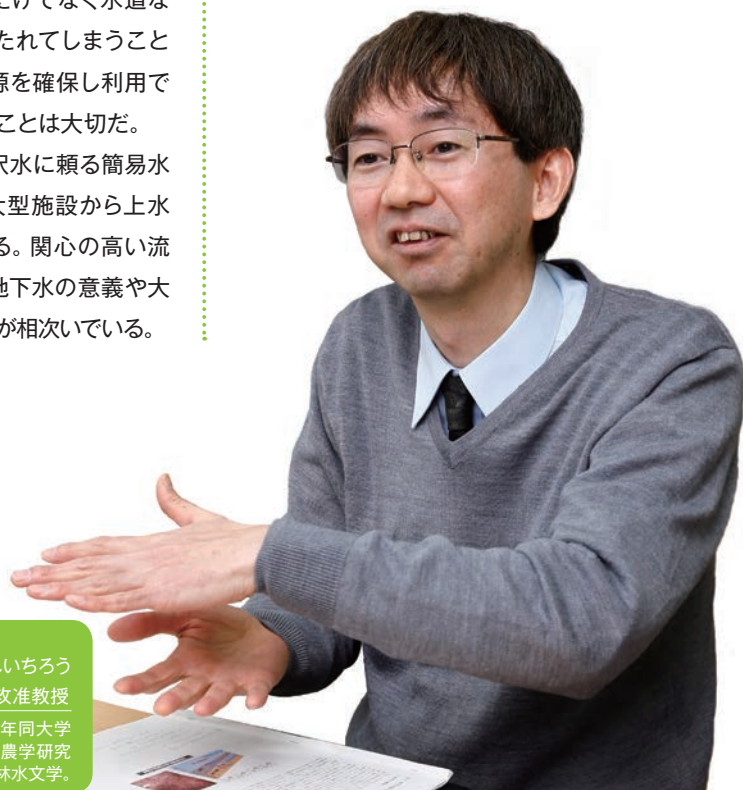
すが、山体地下水は汚染のリスクが低い水源ではないでしょうか」と小杉さんは新たな水源に期待をかけている。

わき水や山体地下水は、ダムや河川、湖からの大規模な取水に比べても汚染の確率が低い。上流での採水となるため、たとえどこか一部の水源が重金属や放射能などで汚染されても、他の水源にはその汚染は及ばない。山の集落は、地震や山崩れの際には、道路だけでなく水道などの生活インフラも絶たれてしまうことが多いため、近場の水源を確保し利用できるように準備しておくことは大切だ。

葛川流域では、山の沢水に頼る簡易水道をやめて、琵琶湖の大型施設から上水道を引く計画も出ている。関心の高い流域住民からは、湧水や地下水の意義や大切さについて問い合わせが相次いでいる。

地下水を抜くことは深層崩壊の予防策の1つ

山体地下水は深層崩壊と呼ばれる山崩れに深く関係していると考えられている。基岩は山の自重によってわずかなづつではあるが変形し、内部に亀裂が発生する。長い年月をかけて岩の中の弱い部分で少しずつ破壊が進む。そして斜面全体で破



小杉 賢一郎 こすぎ けんいちろう

京都大学大学院農学研究科森林科学専攻准教授
1991年、京都大学農学部林学科卒業。93年同大学大学院農学研究科修士課程修了。京都大学農学研究科助手、助教を経て現職。専門は砂防学、森林水文学。



ボーリング調査で得られた基岩のサンプルを深さ1メートル分ずつ横にならべたもの。亀裂の情報をデジタル化して孔隙率（岩石中のすきまの体積の、岩石全体の体積に対する比率）を割り出し、貯水量を推測する。

壊箇所が連続すると非常に危険な状態になる。小杉さんによると、ボーリング調査で実際に基岩の中で土砂になってしまっている箇所が見つかるという(上)。普段は摩擦が働いているため土砂が滑り落ちることはないが、大雨で地下水に浸かると、浮力が働き摩擦力は弱くなってしまふ。最終的に岩の重みが摩擦力に勝ると、一気に崩れて深層崩壊に至るのだ。

2011年9月の台風12号は、四国地方に上陸し中国地方を襲った。台風東側の

紀伊山地は大雨に見舞われ、奈良県や和歌山県、三重県などで深層崩壊が多発した。深層崩壊は、災害の規模が大きい。さらに土砂によっていったんせき止められた川の水が決壊して二次災害を引き起こす恐れもあり、災害対策が長引いた。

「地震によって深層崩壊が発生することもあります。そこにもやはり雨が関係します。山体地下水が大量に存在し、地下水位が上昇しているときに深層崩壊が発生しやすいといわれています」と小杉さ

ん。2004年の新潟県中越地震では、直前に雨が降っていたため、地震の揺れを引き金に深層崩壊が多発した。

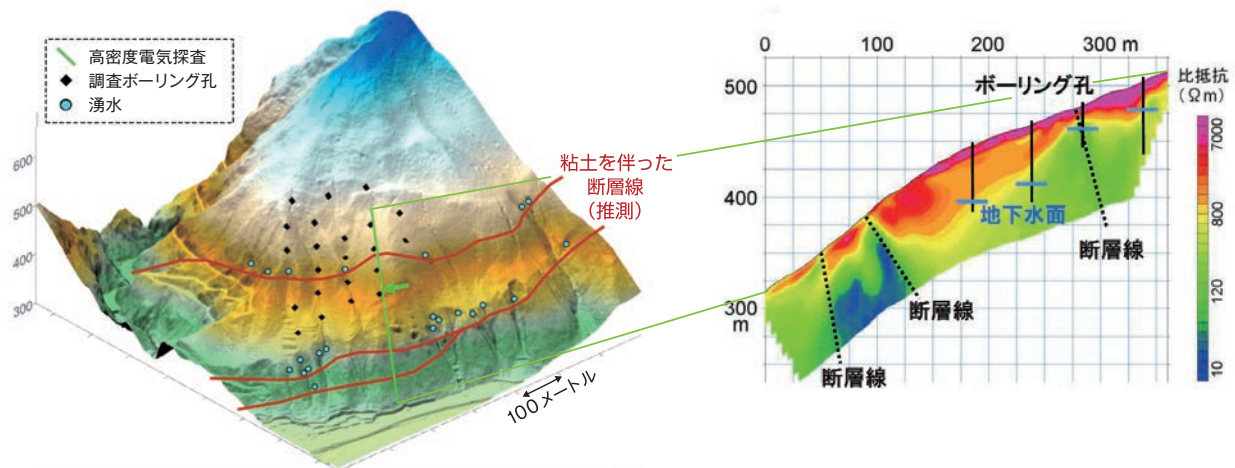
深層崩壊だけでなく、表層付近で起きる崩壊現象でも、山体地下水が関係していると考えられる小杉さんは、表層崩壊や土石流などの専門家でもある。

「土壌の質や地形などからだけでは説明できない事例も多く、浅い所で起きる現象でも、基岩の中にある水を把握することが重要だということが次第にわかってきました」。

被害を軽減するには、地下水を抜いてやればよい。水位を下げて浮力の影響を抑え、安定させるのだ。これが平地では、地下水の汲みすぎで地盤沈下や湧水被害が起きることもあるが、山体は含水量が少ない方が安定であり、森林土壌の保水力に影響することもないので、汲みすぎの心配はあまりないという。

実際、大雨で地滑りが発生するような場所では、日頃から地面がゆっくりと移動することが観測できるため、移動量が大きい斜面では「水抜き工事」がよく行われている。一方、温暖化による多雨で増加が懸念されている深層崩壊は、前もって危険箇所を知ることが難しく、ある日突然に災害が起きる。

「基岩の風化が進んでいるなど深層崩壊の恐れがある所では、きちんと水抜きしていくことが重要です。風化の程度がわからなくても、山体地下水を水資源として利用して水位を下ければ、土砂災害だ



葛川流域での高密度電気探査

左図は葛川流域（滋賀県大津市）での調査地点を図示したもの。湧水（青丸）の下には水が浸透しにくい場所があり、これらをつないだ線が粘土を伴った断層線と推測される。左図の緑色の線に沿って行った高密度電気探査の結果を示したものが右図。水や粘土は比抵抗が小さい。抵抗が不連続になっている部分が断層線と考えている。



表層崩壊は山地などの表土層が崩れるのに対し、深層崩壊では表土層の下の基岩まで崩れるため、大量の土砂が流出し、大規模な土砂災害につながる。深層崩壊は降雨や地震が誘因となることが多く、土石流となって流れ下ったり、崩壊した土砂が川をせき止めた天然ダムが決壊して二次災害を引き起こしたりする。降雨により過剰にたまった地下水も崩壊の誘因となりかねない。複雑な地下水の動きを推定するためにも基岩や山体地下水の解析は欠かせない。

けでなく洪水の軽減にも効果的です」。水資源の開発が減災にも役立つとは一石二鳥である。

基礎研究から、地域の水利用にも乗り出す

これまでの研究から、山体地下水は、気象条件の影響を受けずに良好な水質を安定的に維持していることがわかってきた。少雨のときでも山体地下水を利用すれば渇水対策になる。夏は水温上昇による水質悪化も懸念されるが、山体地下水はその心配も小さい。

今は利用されていない水資源の利用に向けて、小杉さんらは実現可能性を探るフュージビリティ研究にも着手している。小杉さんはこれまで、「土壌物理学」や「森林水文学」などの環境科学の基礎研究が中心で、自然現象の仕組みを科学的に解明してきた。実際に社会に役立てることを目指す社会実装はあまり考慮していなかった。しかし持続可能な水利用のための技術開発を目指すCREST水利用領域に採択されて以降は、その意識が大きく変わったという。

「CRESTを通して、水に関連するさまざまな分野の先生方と交流する機会を得ました。特に工学系の水処理技術を研究している先生が、常に実用化を意識しながら研究を進めていることにとても刺激



写真は鹿児島県始良郡湧水町で1993年8月に起きた表層崩壊の現場。提供：鹿児島大学 地頭菌隆教授

を受けました」。これまでも、いくつかの特許を取得しているものの、活用までは考えなかった。CREST研究に入ってから出願している特許は、民間企業などと実用化を進めている。

「葛川地区の水利用実態を調査したことで、自然現象としての水に着目するだけでなく、社会的・経済的な論点を掘り下げることが必要であることにも気づかされ、CRESTの研究を通して、「水」を新しい視点から見つめ直すことができるようになりました」。

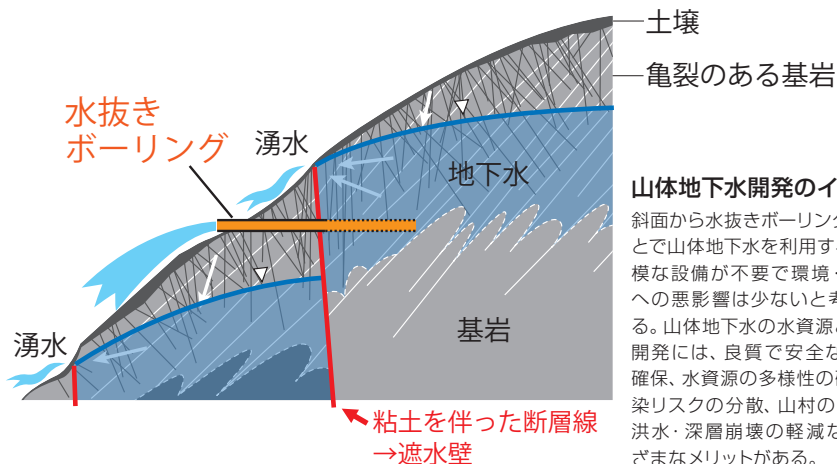
各地で水質が異なる山体地下水を開発することで、ミネラルウォーターやその他の特産品の開発などの地方創生につながる可能性も出ている。

「水に対する意識は、地域ごとの環境に

よって大きく異なります。各地域の実態にあわせた小回りのきく技術が重要です」。「水もの」だけに扱いは難しい。そのままでも飲用できる山体地下水でも、常に無菌状態だと証明できない限り、上水利用には浄水設備が義務づけられている。そこで、湧水の力を利用した小水力発電で動かす小型殺菌装置の開発も目指している。

「山の水は味が良い。独自にわき水を引いている家などもありますが、一層安全な水が提供できます。水利用技術の開発など、地域の特性や環境を考慮しつつ水問題の解決にも努力していきたいですね」。

小杉さんは「水を得た魚」のように意欲的に挑んでいる。



山体地下水開発のイメージ
 斜面から水抜きボーリングすることで山体地下水を利用する。大規模な設備が不要で環境・生態系への悪影響は少ないと考えられる。山体地下水の水資源としての開発には、良質で安全な水資源確保、水資源の多様性の確保、汚染リスクの分散、山村の活性化、洪水・深層崩壊の軽減などさまざまなメリットがある。