

小杉 賢一郎

京都大学大学院農学研究科・准教授

良質で安全な水の持続的な供給を実現するための
山体地下水資源開発技術の構築

§1. 研究実施体制

(1) 小杉グループ

- ①研究代表者: 小杉 賢一郎 (京都大学大学院農学研究科, 准教授)
- ②研究項目
 - ・山体地下水の構造解明に基づく適切な山体地下水資源開発手法の検討

(2) 勝山グループ

- ①主たる共同研究者: 勝山 正則 (京都大学大学院農学研究科, 研究員)
- ②研究項目
 - ・山地河川流出水の量的・質的シグナルに基づく優良地下水帯分布域の推定

(3) 松四グループ

- ①主たる共同研究者: 松四 雄騎 (京都大学防災研究所, 准教授)
- ②研究項目
 - ・地形と山体地下水分布・崩壊危険箇所分布の対応の解明

(4) 中村グループ

- ①主たる共同研究者: 中村 公人 (京都大学大学院農学研究科, 講師)
- ②研究項目
 - ・山体地下水の水質と汚染リスクの検討

(5) 佐山グループ

①主たる共同研究者: 佐山 敬洋 (土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター, 研究員)

②研究項目

- ・改良型 T-SAS モデルを用いた河川流出水の起源の時空間変動解析

(6) 藤本グループ

①主たる共同研究者: 藤本 将光 (京都大学学際融合教育研究推進センター, 特定助教)

②研究項目

- ・山体地下水の構造解明と優良地下水帯推定結果の検証

§ 2. 研究実施内容

山地河川流出水の量, 温度, 水質, 安定同位体比の時空間分布の観測(小杉, 松四, 中村, 藤本グループ)

優良地下水帯探査の基礎となる水文・水質データの収集を行うために, 小起伏花崗岩山地として滋賀県大津市不動寺流域, 小起伏中生層山地として滋賀県甲賀市信楽流域, 大起伏花崗岩山地として兵庫県神戸市西滝ヶ谷流域, 大起伏中生層山地として滋賀県大津市葛川流域を調査地に設定し, 水文・水質観測を行った。

山地河川流出水の量的・質的シグナルに基づく優良地下水帯分布域の推定(中村, 勝山グループ)

観測データが蓄積され始めた不動寺流域, 信楽流域を対象として, 地下水帯分布域の推定に着手し始めた。両流域とも, 流出水の量に関しては流域内の地点毎のバラツキ(空間変動)がかなり大きく, 山体地下水の分布や流動が大きな空間的偏りを持っていることが推察された²⁾。一方, 大起伏堆積岩流域である葛川については, 大起伏花崗岩流域である西滝ヶ谷に比べて, 流出水の波形に大きな空間的変動が見られ, 地下水帯の分布特性に差があることが示唆された。水温に関しては, 当初の予想通り, 基底流量が多い地点で年変動が小さくなる傾向が見られ, 山体地下水の存在域を推定するための指標として有用であると考えられた。一方, イオン濃度に関しては, 花崗岩を母材とする不動寺流域と, 中生層堆積岩を母材とする信楽流域で異なる傾向が見られた。すなわち, 基底流量が多く山体地下水が豊富に存在すると考えられる地点のイオン濃度に着目すると, 不動寺流域では高い傾向が見られたが, 信楽流域では逆に低い傾向が見られた。これは, 花崗岩山地と堆積岩山地では山体地下水の貯留・流動形態が異なることを示唆する結果であると考えられた。同位体シグナルについては, 各地点で採取したサンプルの分析データを整理し, 時間的な変動に基づきパターン分けを行った。

改良型 T-SAS モデルを用いた河川流出水の起源の時空間変動解析(佐山グループ)

流出水が持つ各シグナル(量, 温度, 質, 同位体比)の特徴をより効果的に活用するために, 佐山(共同研究者)がこれまでに開発した T-SAS(time-space accounting scheme)モデルに改良を加え³⁾, 山体内部の地下水流動を解析するためのサブプログラムを組み込んだメインプログラムの開発に着手した。

山体地下水の構造解明と優良地下水帯推定結果の検証(小杉, 藤本グループ)

山体地下水の涵養・流動プロセス, 分布域, 賦存量の実態を明らかにし, 優良地下水帯推定結果を検証することを目的として, 調査ボーリング孔の掘削, 孔内検層, トレーサー試験, コアサンプル解析, 水位・水質計測を行った。その結果, 中生層の堆積岩を地質とする流域の場合, 同地点の複数の深度に, 独立した地下水帯が存在することが判明し, 階層的な地下水分布構造を把握する必要があるとの結論に至った。また花崗岩を地質とする流域では, 山体地下水の水位上昇が降雨イベントに対してかなり遅れることが明らかとなり⁵⁾, 不飽和基岩層内の雨水貯留量が多いことが示唆された。

適切な山体地下水資源開発手法の検討(小杉グループ)

山体地下水の取水については、種々の方法を比較検討し、最適な方法を明らかにすることを目的として、数値シミュレーション手法の開発を行った⁹⁾。地形や土層厚分布データを入力とし、地表面流や土層内の飽和側方流を追跡する従来型のシミュレーションモデルでは、多くの山地流域の流出特性を再現できないことが明らかとなった⁴⁾。山体地下水の流動を厳密な物理プロセスに基づいてシミュレートすることは、入力データが十分に得られていない現時点では不可能である。そこで、タンクモデルを用いた数値シミュレーションを行った⁷⁾。図-1 に示すタンクモデルを用いて解析を行ったところ、裸地を多く含む山地流域(図-2 の Watershed C)や土層が薄い山地流域(図-2 の Watershed B)では、地表面流や土層内の飽和側方流のみで流出が再現できたのに対し、森林が成熟し森林土壌が発達した流域(図-2 の Watershed A)では、流出の再現において山体地下水の流動を模したタンク(図-1 の Tank C)が必要不可欠となることが明らかとなった。

物理プロセスに基づく数値シミュレーションに必要な基礎データを、効率的に取得するための地質調査・水文観測・リモートセンシング手法について検討を行った。その結果、山地の土壌水分分布を把握する手法として熱赤外リモートセンシングを活用できることがわかった³⁾。また高密度電気探査が、基岩を含めた斜面内部の水分分布や、山体地下水水位の変動を把握するための有用な手法となることが示された¹¹⁾。さらに、森林土壌の厚さの空間分布を効率良く把握するための手法として、高密度電気探査と簡易貫入試験を組み合わせる技術を新たに提示した¹⁾。加えて、予備的な取水実験を西滝ヶ谷流域で実施し、シミュレーションモデルの開発・検証に有効なデータの取得方法について検討した。

地形と山体地下水分布・崩壊危険箇所分布の対応の解明(松四グループ)

地下水の流動・賦存状況や、深層崩壊発生危険性について多くの情報を含むとされる山体の地形情報を、地下水資源開発に有効に活用する方法について検討した。まず、葛川流域での LiDAR データ計測を実施した。これによって、全流域について詳細な地

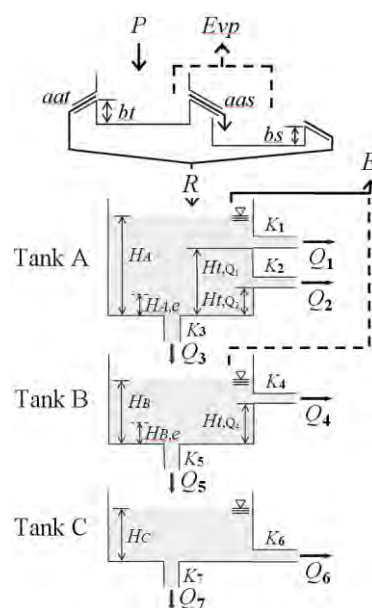


図-1 山地流域の流出を再現するためのタンクモデル

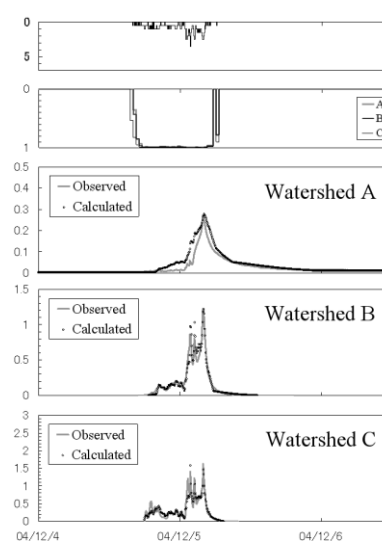


図-2 タンクモデルによる流出の再現結果

形解析を実施するためのデータセットを整えることができ、解析に着手し始めた。その結果、地層の走向方向への山体地下水の選択的な流動が起きること、断層線に沿って地下水位分布が不連続になるため、断層線を横切る斜めボーリングによって山体地下水資源を効率良く開発できる可能性があることが示された。深層崩壊発生の危険性については、豪雨¹⁰⁾や地震⁶⁾による深層崩壊発生の事例について検討を加えた。山体地下水位の上昇は、豪雨時に崩壊の誘因となるだけでなく、地震により発生する崩壊の規模を大きくする可能性があり、地下水位の制御が土砂災害軽減の上で重要になると考えられた。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

1. Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Sumida, J., Tani, M. and Mizuyama, T. (2012) Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope, *Geomorphology*, **145-146**, 56-69. (DOI:10.1016/j.geomorph.2011.12.035)
2. Tani, M., Fujimoto, M., Katsuyama, M., Kojima, N., Hosoda, I., Kosugi, K., Kosugi, Y. and Nakamura, S. (2012) Predicting the dependencies of rainfall-runoff responses on human forest disturbances with soil loss based on the runoff mechanisms in granite and sedimentary rock mountains. *Hydrol. Proc.*, **26**, 809-826. (DOI: 10.1002/hyp.8295)
3. 木下篤彦, 岡本敦, 河野貴司, 船越和也, 中島達也, 岡野和行, 山口和也, 小杉賢一朗 (2012) 熱赤外線センサーを用いた斜面の土壌水分の分布特性把握に関する研究, 砂防学会誌, **64**(6), 4-12.
4. 小杉賢一朗, 木下篤彦, 藤本将光, 水山高久, 三道義己 (2012) 地形に依存した雨水流動追跡に基づく表層崩壊発生予測の問題点, 砂防学会誌, **65**(1), 27-38.
5. Masaoka, N., Kosugi, K., Yamakawa, Y., Mizuyama, T., and Tsutsumi, D. (2012) Application of a combined penetrometer-moisture probe for investigating heterogeneous hydrological properties of a foot slope area, *Vadose Zone J.*, **11**. (DOI:10.2136/vzj2011.0064)
6. Yamada, M., Matsushi, Y., Chigira, M. and Mori, J. (2012) Seismic recordings of landslides caused by Typhoon Talas (2011), *Japan Geophysical Research Letters*, **39**, L13301. (DOI:10.1029/2012GL052174)
7. 糸数哲, 小杉賢一朗, 恩田裕一, 蔵治光一郎, 田中延亮, 後藤太成, 太田岳史, 水山高久 (2013) 通常降雨イベントにより同定されたタンクモデルを用いた豪雨イベントの再現精度, 水文・水資源学会誌, **26**(2), 85-98.
8. 佐山敬洋 (2013) 大規模洪水氾濫の時空間起源分析に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), **69**(4), I_464-I_468.
9. Toriyama, J., Ohnuki, Y., Ohta, S., Kosugi, K., Kabeya, N., Nobuhiro, T., Shimizu, A., Tamai, K., Araki, M., Keth, S. and Chann, S. (2013) Soil physicochemical properties and moisture dynamics of a large soil profile in a tropical monsoon forest Original Research Article, *Geoderma*, **197-198**, 205-211.
10. 地頭菌隆, 笹原克夫, 小杉賢一朗, 五味高志, 石塚忠範 (2012) 深層崩壊の予測, 第6回土砂災害に関するシンポジウム論文集, 53-58.

11. Yamakawa, Y., Masaoka, N., Kosugi, K., Tada, Y. and Mizuyama, T. (2013)
Application of the electrical resistivity imaging for measuring water content
distribution in hillslopes, *J. Disaster Res.*, **8**(1), 81-89.