

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23221009

研究課題名(和文) 地形・土壌・植生の入れ子構造的発達をふまえた流域水流出特性の変動予測

研究課題名(英文) Prediction of catchment runoff changes based on characterizing a nested structure consisting of the developments of topography, soil and vegetation

研究代表者

谷 誠 (TANI, MAKOTO)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00314245

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 122,900,000円

研究成果の概要(和文)：研究成果の概要(和文)：降雨流出応答に対して流域条件の及ぼす影響について検討した。その結果、この影響は、基岩から生成される土粒子が植生根系とパイプ状水みちの形成によって土壌層として発達するという長期過程によって制御されることを、森林水文学と地形学の学際的な野外観測に基づいて明らかにした。また、その影響を理論的に定量評価する手法や流域水文データから抽出する手法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the evaluation of effects of catchment properties on the rainfall-runoff responses. Our interdisciplinary investigations on forest hydrology and geomorphology demonstrated that the effects were controlled by a long-term evolution process of the soil layer from the weathered bedrock, which was supported by the co-evolutions of vegetation root systems and efficient drainage pathways. New methodologies were developed to theoretically quantify the effects and extracting them from the catchment hydrological records.

研究分野：複合新領域、社会・安全システム科学、自然災害科学

キーワード：森林水文学 蒸発散 雨水流出機構 土の移動 土壌層発達 崩壊発生 比較水文学 洪水予測

### 1. 研究開始当初の背景

降雨に対する流出応答に対して流域条件がどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることは、いまだに困難である。その理由としては、地形・土壌・植生などの流域条件が不均質・複雑であることが挙げられる。本研究は、こうした流域条件が異なる時間スケールをもって変化・発達していることに注目し、その入れ子構造を把握することで流域条件の流出に及ぼす影響予測の手法が改善でき、流域管理にも貢献できるのではないかとこの着想に基づいて提案された(図1)。

国際的にみると、IAHS(国際水文科学協会)は、その重点課題を2003~2012年のPUB(未観測流域の予測)から、2013~2022年のPanta Rhei(万物は流転する)へ発展させようとしており、本研究はその国際的な水文学の潮流に先駆ける先端研究として位置づけられる。

### 2. 研究の目的

流域の現在の形状は、長期に進行する変

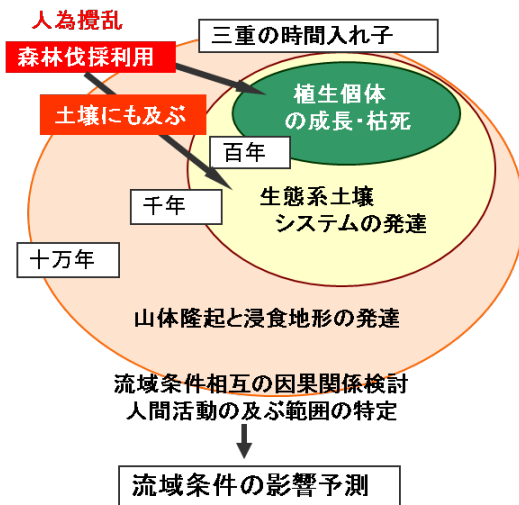


図1 入れ子構造的発達の概念図

化・発達の一断面を見ているのであって、例えば現在の土壌層の厚さの空間分布は、その発達や侵食の歴史の結果に他ならない。

そこで、本研究は、

(1) 樹木からの蒸発散量に対して、気象環境条件の変動と個体成長変化の影響を分離評価すること

(2) 基岩と土壌から成る複雑な地下構造における流出機構の詳細な観測による解明及びその流出に及ぼす影響の評価手法の開発

(3) 斜面上において基岩から土粒子が生成され土壌層が発達して重力で侵食されるという、土の移動過程の包括的な把握

(4) 降雨流出の既存データを比較することから、降雨流出応答に及ぼす流域条件を抽出すること

を目的とした。これらを総括して、流域条件の流出影響研究のパラダイムを変革することをめざす。

### 3. 研究の方法

前項で述べた4つの研究目的に沿い、方法論を説明する。

まず(1)について、蒸発散は水が気化熱を得て水蒸気に相変化する物理現象に過ぎないが、光合成を行う植物はその生存戦略に基づきこれを制御する。したがって、物理モデルに生理的な制御を導入する点がきわめて重要で、観測データ解析に基づき、この制御を扱える多層モデルの開発を進め、蒸発散に及ぼす植物成長と気象条件の影響の同時変動の分離評価をめざした。

(2)については、地下の流出空間の不均質性がその長期にわたる変化発達によって形成されるとの作業仮説は立てられたが、具体的把握は難しい。そこで、多数のボーリング孔設置やトレーサーによる水移動の追跡などの高密度の調査を展開した。また、斜面地形や土壌物理性が降雨流出応答に及ぼす影響を、不均質性の効果をも加味して評価できる手法開発を試みた。

(3)については、ゼロ次谷を対象に、宇宙線生成核種を用いた土粒子生成速度の測定など新しい手法による調査、植生根系の粘着力補強測定に基づく3次元的な崩壊防止力の推定、それを用いた斜面安定評価を行った。

(4)については、長期の小流域データや全国多数の山地流域データを基に、流出モデルのパラメータと流域条件の関係を調べ、降雨流出応答に及ぼす流域条件について、比較水文学的に抽出することを試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) 蒸発散量の変動

樹木を主体とする生態系である森林においては、少雨年を含む年々気候変動に応じて、光合成・蒸散を一定に維持する傾向が強い。この傾向は最近のタワーを用いた世界各地の観測研究で明らかにされてきたのであるが、本研究においては、小流域水文試験地データの解析でも、多層モデルを用いた解析でも確認された。すなわち、瀬戸内沿岸の少雨地帯に位置する森林総研の竜ノ口山試験地においては、年蒸発散量が気温によって増加する傾向が見られ、少雨年においても土壌貯留量を減らすことで年蒸発散量がほとんど低下しないこと、伐採後の樹木が若齢である10~15年程度の期間はこうした維持傾向が失われることなどが明らかになった。また、滋賀県上山の桐生試験地ヒノキ林を対象に、森林構造を詳細に反映できるSVATモデルを用いて蒸発散を蒸散・遮断蒸発・地面蒸発に区分して評価したところ、蒸散量は気候年々変動に対して一定に維持されることが明らかになった。今後、気候の温暖化や1960年植栽をピークとする人工林の高齢化が進み、蒸発散量の変化が流出に及ぼす影響やそ

れへの森林管理対策が重要な課題になるが、それに対して貢献する成果が得られた。

(2) 降雨流出応答とその機構

洪水流出を産み出す機構としては、地表面流が主体であると単純に考えることはできず、土壌層・基岩層の役割も重要である。本研究では、地質や地形の異なる小流域を対象として、その空間スケールでの流出機構の多様性を詳細な現場観測によって理解するとともに、土壌層と風化基岩層を合わせた透水性の多孔質媒体における水理学的特性を再検討して、その降雨流出応答に及ぼす影響を評価する理論的な研究を実施した。

花崗岩山地小流域においては、すでに多くの観測知見が蓄積されているが、基岩地下水の流出に及ぼす影響について、起伏が小さい田上山と大きい六甲山での比較を行い、六甲の西おたふく山試験地では基岩地下水変動が渓流の流出変動を支配する傾向があり、田上の桐生や不動寺試験地よりも安定した流況がみられることがわかり、その原因として山岳隆起の大きい六甲の方が基岩の帯水層の貯留変動大きいことが考えられた。また、桐生試験地では、小流域内部の次数の異なるサブ流域での水質観測を実施し、洪水流出は地表面流やパイプなどを伝って流れる流出も含まれるが、土壌や基岩からの流出で産み出される成分が大きく、次数が大きくなると、基岩地下水の占める割合が大きくなる傾向が見いだされた(図2)。

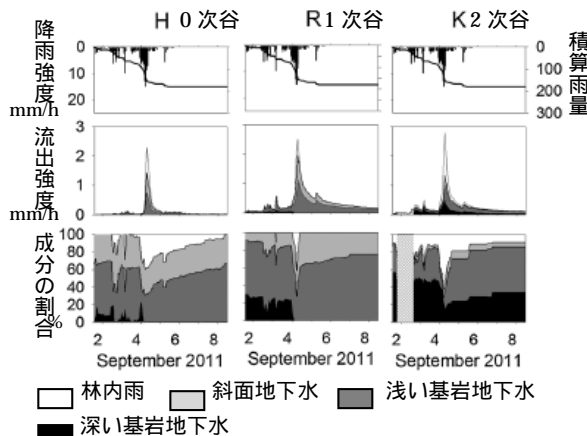


図2 流域スケール毎の洪水流出水の起源  
Iwasaki et al., HP, 2014 一部改変

堆積岩の竜の口山試験地では、土壌層が十分に湿潤になった期間には、花崗岩に比べて洪水流出の割合が非常に大きくなる傾向があるが、基岩地下水面の継続観測によって素早い変動が実証され、15m以上の深い地下構造が洪水流出に関与していることが明らかになった。

これらの結果から、流出を産み出す空間として、従来想定されていたよりも深い地下構造を考える必要性が大きいこと、多様な流出空間での流出機構があることは前提ではあ

るにしても、その中で、不飽和帯と飽和帯から構成されるきわめて空間的に不均質な多孔質媒体での水の貯留・移動機構が、洪水流出・基底流出を産み出していることが推測された。

そこで、多孔質媒体での理論的な解析を実施した。すなわち、地形が単純で土壌物理条件が均質である斜面土壌層における飽和不飽和浸透流を対象に、流出をならしてピークを低くする効果(RBP: Runoff buffering potential)への地形・土壌条件の影響を評価する手法を開発した。この解析では、土壌物理性は均質であるとしてもパイプ状水みちの存在する場合も検討したが、水みちの効果は、不飽和帯の土壌水と飽和帯の地下水とでは大きく異なるものであった。水みちが含まれると、RBPは斜面の水平長の影響を受けにくく、土壌層の厚さや土壌物理性によって変化する(図3)。こうした傾向があるため、従来のキネマティックウェーブ法などの流出モデルでは、地形の流出に及ぼす影響が評価しにくいことが理解されるとともに、

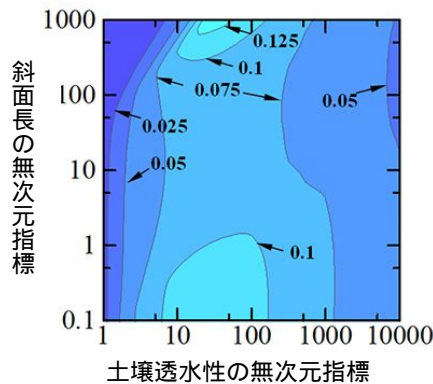


図3 斜面水平長や土壌透水性がRBPに及ぼす影響

Tani, HESS, 2013 を一部改変

パイプ状水みちの効果を含む斜面条件の流出に及ぼす影響が定量的に解析できるようになった。

(3) 土壌層の発達と土の移動

雨水が流出する空間である土壌層は、風化基岩表面から土粒子が生成され、生態系が成立することで発達する。また、重力がはたらくので長期の時間スケールでは、いずれ傾斜方向に移動し渓流の下流に運ばれる。そこでまず、樹木根系の役割をその強度を測定する実験を基にして検討した。その結果、従来指摘されてきた土壌層が基岩につながり止められていることによる根系効果の他に、土粒子を互いに結びつける粘着力補強分の水平分布も重要であることがわかった。この結果を基に、根系密度や間伐の崩壊危険性に及ぼす影響などを評価できるよう、二次元マップの作成手法を開発した(図4)。

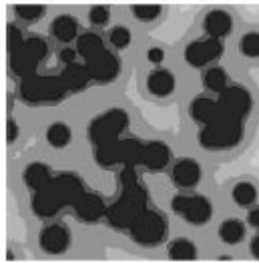


図4 ヒノキ人工林の根による粘着力補強分の2次元マップ

黒い部分が強く、白い部分が弱い

阿辻、長野県林業センター技報、2013 による

こうした根の補強によって、崩壊後に土壌層が生態系とともに厚く発達することになるが、集水地形であるゼロ次谷斜面ではその地形特性によって土の移動形態が異なる。すなわち、尾根線の周囲では、土壌植生が一体化してクリープが生じるが、それによって土が集積する凹地集水域では、土壌層の厚さ増加とともに斜面安定条件が低下し、間欠的に崩壊が発生する。重力によるこの2つの土の移動形態を実証するため、本研究では、比叡山白川試験地の花崗岩斜面で宇宙線生成核種を利用して、風化基岩表面からの土粒子生成速度推定などの調査を行った。その結果、土の生成速度とクリープ移動のバランスによって地形曲率にしたがった土壌層厚さの分布が成立していること、凹地部ではこれを崩壊によって斜面外に排出されるプロセスが推定された(図5)。この実測に基づく結果は、土砂災害の予測評価を、長期にわたる土壌層発達と崩壊の繰り返しの中に位置づけるべきことを強く示唆している。

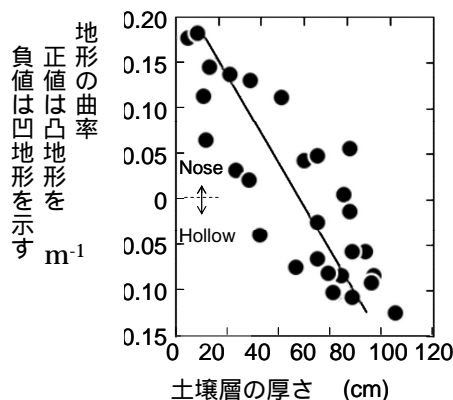


図5 斜面地形の凹凸と土壌層厚さの関係  
松四：地形、投稿中を一部改変

また、急勾配斜面における崩壊後の土壌層の発達は、頻繁に地表面流が発生する環境では、たとえ根系による粘着力補強が大きくても斜面安定条件が満足されずに、土が侵食されてしまい、とうてい不可能である。したがって、少なくとも崩壊を主たる土の移動形態となる凹地部では、パイプ状水みちによる豪雨時の地下水排水が土壌層発達の前提条件になる。したがって、土壌層発達過程という

長期現象が降雨流出過程という短期現象を制御していることになる。降雨流出予測も崩壊発生予測もこのことを踏まえなければならないわけで、この概念を実証的に示したことは本科研の重要な成果である。

#### 4) 比較水文学

山地流域におけるデータを既存の流出モデルで再現したうえで、地質・地形・土壌・森林の流出に及ぼす影響を比較検討した。従前より言われているように地質の影響が大きかったが、小流域の長期データでは長期の森林利用による土壌層厚さの変化の影響も抽出された。また、全国の山地流域の164の水文データを収集してモデルパラメータと流域条件の因果関係を統計的に検討したところ、顕著に影響していた因子は流域の流出経路の平均長のみで、斜面条件の影響はほとんど現れなかった。こうした比較水文学研究は端緒についたばかりであるが、データが膨大に蓄積していることから見て、本研究で飽きたかにした長期発達過程やRBP評価に関する知見を参考にしながら、今後展開していくことが望まれる。

なお、研究成果は、2014年4月に日本地球惑星科学連合のセッションを開催し、水文学と地形学の分野で活躍中のJ.J. McDonnellとA. Heimsathを招いて国際的に議論したほか、2016年3月出版の書物「谷誠：水と土と森の科学(京都大学学術出版会)」にまとめた。さらに、数本の論文を日本地形学連合の機関誌「地形」の特集号「0次谷水文地形学のフロンティア(仮題)」において公表する予定で、現在編集作業中である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計76件)

Iwasaki K, Katsuyama M, Tani M: Effects of deep percolation on dissolved inorganic nitrogen exports from forested headwater catchments, Journal of Forest Research 21, 57-66, 2016, 査読有。

Iwasaki K, Katsuyama M, Tani M: Contributions of bedrock groundwater to the upscaling of storm-runoff generation processes in weathered granitic headwater catchments, Hydrological Processes 29, 1535-1548, 2015, 査読有。

松四雄騎・松崎浩之・牧野久識：宇宙線生成核種による流域削剥速度の決定と地形方、程式の検証、地形 35(2)、2014、査読有。

松四雄騎・松崎浩之・千木良雅弘：宇宙線生成核種による山地流域からの長期的土砂生産量の推定、応用地質、54、272-280、2014、査読有。

Katsura S., Kosugi K., Yamakawa Y., Mizuyama T.: Field evidence of groundwater ridging in a slope of a granite watershed

without the capillary fringe effect, J. Hydrol. 511, 703-718, 2014, 査読有。

谷誠・松四雄騎・野口正二・小杉賢一郎・内田太郎：2014 年度日本地球惑星科学連合大会セッション「A-HW07 Insight into change and evolution in hydrology (水文学における変化・発達の見点)」の報告、水文・水資源学会誌 27、311-319、2014、査読あり。阿辻雅言：崩壊に強い森林とは、長野県林業技術センター148、6-11、2014、査読有。

Tani M.: A paradigm shift in stormflow predictions for active tectonic regions with large-magnitude storms: generalisation of catchment observations by hydraulic sensitivity analysis and insight into soil-layer evolution. Hydrol. Earth Syst. Sci. 17, 4453-4470, 2013, 査読有。

谷誠：洪水流出のモデル化を圧力伝播の観点から捉え直す、水文・水資源学会誌 26、140-152、2013、査読有。

小杉賢一郎・藤本将光・山川陽祐・正岡直也・糸数哲・水山高久・木下篤彦：山体基岩内部の地下水位変動を解析するための実効雨量に基づく関数モデル、\*砂防学会誌、66(4)、21-32、2013、査読有。

小杉賢一郎：山地源流域の山体地下水が雨水の流出に果たす役割、地域自然史と保全 35(2)、1-6、2013、査読有。

岩谷綾子、金子智紀、和田覚、野口正二：スギ人工林における間伐が樹冠通過雨量に及ぼす影響 - 秋田県長坂試験地における無積雪期間の事例 -、東北森林科学会誌 18、38-42、2013、査読有。

阿辻雅言・北原曜・小野裕：林分における崩壊防止力二次元分布図の構築、中部森林研究 61、9-12、2013、査読有。

神田誠也・北原曜・小野裕：山地急傾斜地におけるヒノキ単木周囲の崩壊防止力、中部森林研究 61、13-16、2013、査読有。

Tani M., Fujimoto M., Katsuyama M., Kojima N., Hosoda I., Kosugi K., Kosugi Y., Nakamura S.: 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. Process 26, 809-826, 2012. 査読有。

小杉賢一郎・木下篤彦・藤本将光・水山高久・三道義己：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、2012、査読有。

谷誠・細田育広：長期にわたる森林放置と植生変化が年蒸発散量に及ぼす影響、水文・水資源学会誌 25、71-88、2012、査読有。

[学会発表](計 111 件)

Tsuruta K., Kosugi Y., Takanashi S., Tani M.: Interannual variations and its control factors of evapotranspiration in a temperate Japanese

cypress forest. JpGU, Yokohama, 2014.

Noguchi, S., Murakami W., Tani M.: Changes in interannual variability of runoff in a conifer and deciduous hardwood mixed forested watershed. JpGU, Yokohama, 2014.

Uchida T., Asano Y., Kanbara J., Tomomura M.: Is there any general rainfall-runoff response function in mountainous catchments? JpGU, Yokohama, 2014.

Atsugi M., Kitahara H., Ono H.: The making method of two dimensional distribution map of the collapse prevention force with tree survey. JpGU, Yokohama, 2014.

Kurokawa U.: The growth-collapse simulation method of soil depth in which the effect of vegetation was taken into consideration. JpGU, Yokohama, 2014.

Matsushi Y., Matsuzaki H.: Soil production functions and soil layer mobility in Japanese mountainous catchments underlain by granitoid rocks. JpGU, Yokohama, 2014.

Hosoda I.: Interrelation between hillslope soil moisture and stream flow in a Paleozoic sedimentary rock watershed. JpGU, Yokohama, 2014.

Fujimoto M., Kosugi K., Masaoka N., Banba N., Ueda R., Sakai Y., Fukagawa R., Tani M.: Variability of the chemistry of streamwater and bedrock groundwater at a weathered granite mountain, Japan. JpGU, Yokohama, 2014.

Katsuyama M., Kosugi K., Tani M.: Mean residence time and hydrochemistry of bedrock groundwater aquifer in a Granite mountain. JpGU, Yokohama, 2014.

Tani M.: Toward understanding causal interrelationships between stormflow and erosion processes in a steep zero-order basin. JpGU, Yokohama, 2014.

[図書](計 3 件)

谷誠：水と土と森の科学、京大出版、243、2016。

谷誠：豪雨時に森林が水流出に及ぼす影響をどう評価するか、蔵治光一郎・保屋野初子編「緑のダムの科学」所収、築地書館、46-65、2014。

谷誠：水循環をつうじた無機的自然・森林・人間の相互作用系、柳澤雅之・河野泰之・甲山治・神崎護編「地球圏・生命圏の潜在力 - 熱帯地域社会の生存基盤 - 」所収、京大出版、69-105、2012。

[その他]

(1) 京都大学ホームページ：未曾有の豪雨時の流量は予測可能か？ - 観測例のない豪雨にも適用できる洪水流量の予測手法を開発、[http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news\\_data/h/h1/news/6/2013\\_1/140106\\_2.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news/6/2013_1/140106_2.htm)

谷誠ホームページ：本研究を掲載

<https://sites.google.com/site/guchenghomupejitanimakoto/yan-jiu-shao-jie>

(2) 新聞掲載

朝日新聞：2014年12月13日、(私の視点)  
防災対策 森林の再生と切り離せぬ  
科学新聞：2014年1月31日、未曾有の豪雨  
にも適用 洪水流量予測手法開発  
京都新聞：2014年1月25日朝刊、豪雨時の  
河川流量予測手法を開発

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷誠 (TANI MAKOTO)  
京都大学農学研究科教授  
研究者番号：00314245

(2) 研究分担者

小杉賢一郎 (KOSUGI KEN'ICHIROU)  
京都大学農学研究科教授  
研究者番号：30263130  
鶴田健二 (TSURUTA KENJI)  
京都大学農学研究科研究員  
研究者番号：70638593  
勝山正則 (KATSUYAMA MASANORI)  
京都大学学際融合教育研究推進センター  
特定准教授 研究者番号：40425426  
松四雄騎 (MATSHUSHI YUKI)  
京都大学防災研究所准教授  
研究者番号：90596438  
中北英一 (NAKAKITA EIICHI)  
京都大学防災研究所教授  
研究者番号：70183506  
藤本将光 (FUJIMOTO MASAMITSU)  
立命館大学理工学部助教  
研究者番号：60511508  
北原曜 (KITAHARA HIKARU)  
信州大学名誉教授  
研究者番号：80324234  
岩田拓記 (IWATA HIROKI)  
信州大学理学部助教  
研究者番号：10466659  
葛葉泰久 (KUZUHA YASUHISA)  
三重大学生物資源学研究科教授  
研究者番号：50373220  
内田太郎 (UCHIDA TARO)  
国土技術政策総合研究所主任研究官  
研究者番号：60370780  
野口正二 (NOGUCHI SHOJI)  
森林総合研究所チーム長  
研究者番号：90343780  
黒川潮 (KUROKAWA USHIO)  
森林総合研究所九州支所主任研究員  
研究者番号：10353674  
細田育広 (HOSODA IKUHIRO)  
森林総合研究所関西支所チーム長  
研究者番号：60353843

(3) 連携研究者

小杉緑子 (KOSUGI YOSHIKO)

京都大学農学研究科助教  
研究者番号：90293919