

平成 22 年 5 月 7 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006 ～ 2009
 課題番号：18201036
 研究課題名（和文） 基岩－土壌－植生－大気連続系モデル開発による未観測山地流域の洪水
 渇水の変動予測
 研究課題名（英文） Prediction of flood and drought in ungauged mountainous basins by
 developing a hydrologic model for the bedrock-soil-vegetation-atmosphere continuum
 研究代表者
 谷 誠（TANI MAKOTO）
 京都大学・大学院農学研究科・教授
 研究者番号：00314245

研究成果の概要（和文）：観測の行われていない流域に対して流域条件の違いやその変化の洪水・渇水への影響を推定できるようにするため、地質等の異なる流域内の水循環プロセスを詳細に調べ、森林成長ともなう蒸発散変化、地形・土壌・基岩の特性が流出に及ぼす影響、伐採の水量に及ぼす影響などを評価した。また、降雨条件、土壌・地形条件、マクロポアー効果を貯留型流出モデルに対してパラメータとして導入する新たな手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：To predict influences of catchment properties and their changes on flood and drought for ungauged catchments, effects of forest growth on evapotranspiration, effects of topographic, soil and bedrock properties on runoff and effects of forest clearing on water runoff were assessed based on detailed investigations on hydrological processes. A new parameterization was developed by representing rainfall intensity and soil, topographic properties and macropore effects as parameter values of a storage-type runoff model.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合 計
2006 年度	14,300,000	4,290,000	18,590,000
2007 年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2008 年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
年 度			
総 計	39,800,000	11,940,000	51,740,000

研究分野：森林水文学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：水災害、未観測流域水文予測、斜面水文学、水循環、蒸発散、土壌水分、基岩地下水、マクロポアー、スケール問題

1. 研究開始当初の背景

水・土砂災害防御や水資源確保は安全な生活の維持における重要課題であるが、個々の流域の水・土砂害や渇水の発生予測は、地形、植生、土壌、基岩構造がきわめて小さい空間

スケールにおいて不均質であるため、実際に観測しないでも予測するという水準までには至っていない。そこで国際水文学協会（IAHS）においては未観測流域の予測（PUB）の活動が進行しており、斜面観測に基づく比較

(SLICE)を実施して、森林・土壌などの流域条件変化の影響をモデルでの流出変化を予測する動きが高まっている。

2. 研究の目的

本研究では、未観測山地流域の洪水濁水予測に介在する不確実性を減少させるため、山地河川流域における詳細な観測を行って、基岩-土壌-植生-大気連続系の水輸送の予測モデルを、各種不均質性の効果を取り込んで構築する。

3. 研究の方法

地質等の条件の異なる小流域試験地において水循環の詳細な観測を行う。すなわち、土壌-樹木-大気連続系の水輸送に関する観測、複雑地形による大気の流れの分布観測、花崗岩小流域における斜面地形や空間スケールの影響に関する比較観測、花崗岩・堆積岩の小流域における基岩地下水変動を含む流出観測などを実施する。

また、モデル開発については、樹種や群落構造のガス交換に及ぼす影響を評価できる多層モデル、斜面上の土壌・基岩を通じた水移動モデル、斜面の地形・土壌条件を貯留型モデルにパラメータ化する手法などを開発する。

4. 研究成果

(1) ヒノキの成長にともなう蒸発散の変化について 33 年間の小流域水収支観測から推定し、大きな変化がないこと、短期水収支法による蒸発散の季節変化が渦相関法観測の結果と一致し (図 1)、ヒノキ林成長にともなう蒸発散の高精度の情報が得られた。

この結果を基に、樹種や群落構造のガス交換に及ぼす影響を評価できる多層モデルを開発してシミュレーション解析を試みた。その結果、30 年以前、樹高が低く葉面積指数が小さい幼齢林時代には、壮齢林に比べて気孔がより大きく開きやすい性質があったことが示唆された。

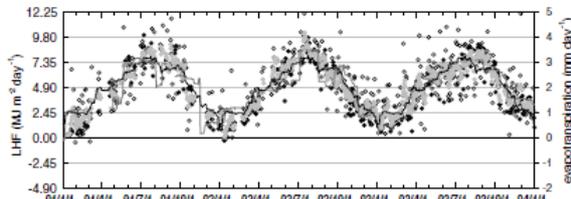


図 1 ヒノキ林流域における短期水収支法による蒸発散の季節変化の推定結果 (折れ線) と渦相関法による結果 (点) の比較 (文献⑫)

(2) 風化花崗岩の斜面での水文観測により、溪流源頭にある谷頭部斜面と溪流側方に位置する谷壁斜面での洪水発生を比較したと

ころ、土壌層内に発生する一時的地下水の寄与が前者でより大きいことから、その発生域が斜面上方により拡大しやすいことが明らかになり (図 2)、斜面地形別の洪水流出モデルの作成に必要な知見が得られた。また、風化花崗岩小流域においては、谷頭斜面と谷壁斜面、2、3、5 次の「入れ子」になった流域溪流での量水観測結果を解析したところ、斜面地形により流出特性が異なるが、小流域間の差は小さいこと、降雨の規模によって小流域の洪水流出に対する斜面の寄与が変化することが明らかになった。

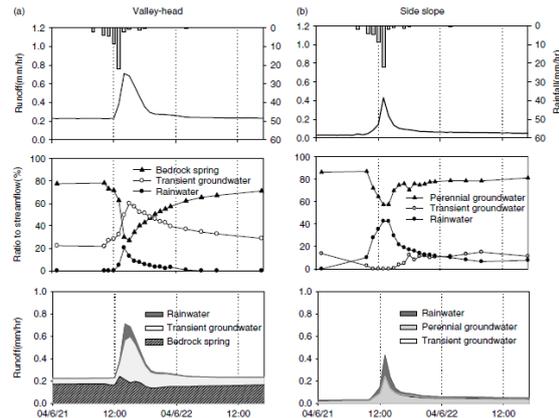


図 2 谷頭部 (左) と谷壁 (右) の両者面における洪水時の流出成分の分離結果 (文献⑩)

(3) 風化花崗岩斜面における基岩地下水の水位と水質の変動を観測することにより、基底流に関して基岩からの流出の寄与の大きさを推定することができた。また、基岩内の地下水水位が夏の長期降雨によって大きく変動すること、シリカ濃度が土壌水の影響を受けて低下するが、地下水水位が下降した後も数ヶ月にわたって低濃度が持続することがわかった。このことは、基岩地下水の動態を 2~3 次元的に把握する必要性を示しており、濁水予測のためには、土壌・基岩を通じた水流動のモデル化が重要であることがわかった。

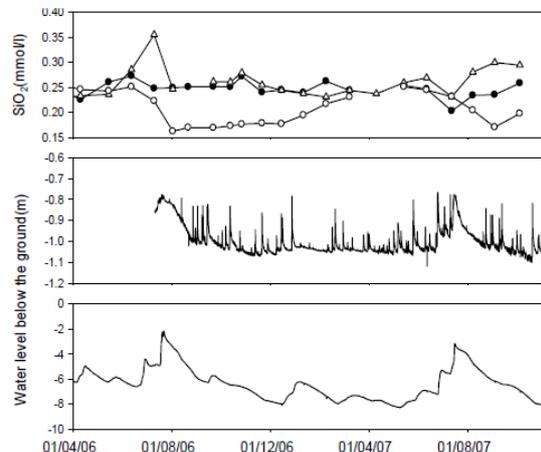


図 3 谷壁斜面の基岩地下水の水位 (中: 末端、下: 中腹) およびその SiO_2 濃度 (上、●: 末端土層内、△: 末端基岩内、○: 中腹基岩内) の季節変化 (藤本ら、未発表)

(4) 堆積岩山地での流出機構に関しては、斜面2カ所でのボーリングを実施した結果、地下水面が深いこと、土壌が乾燥している場合は変動がないが、湿潤な場合は地下水変動の応答が速やかになることが明らかになった(図4)。これは、降雨流出応答に対して乾湿の影響が大きい結果や湿潤時に洪水流出率が1に近くなるという既存の解析結果を流出メカニズムからよく説明している。このことから、流出モデルには、花崗岩山地と堆積岩山地の流出メカニズムの特徴を反映させる必要があることが実証された。

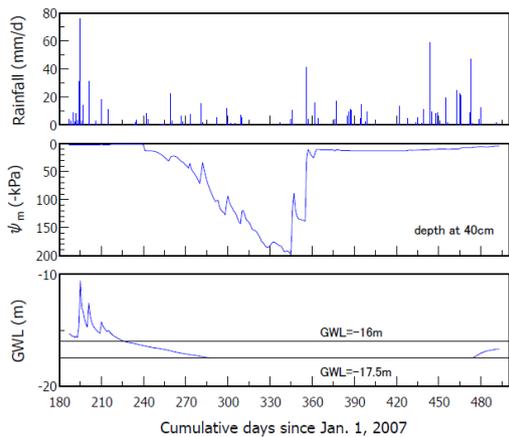


図4 堆積岩山地の斜面における土壌水分、地下水位変動の観測結果
上：降水量、中：深さ40cmの土壌の圧力水頭、下：地下水位変動(細田ら、未発表)

(5) 堆積岩山地における林齢の異なる人工林流域での流出比較を行ったところ、スギ林の成長に伴う森林土壌表層の厚さの増加が洪水ピーク流出量の減少に効果があることがわかった。また、伐採直後に洪水ピークに大きな増加がみられなかったこともわかったが、それは架線集材における土壌攪乱の少ない伐採作業のためであることと説明された(図5)。

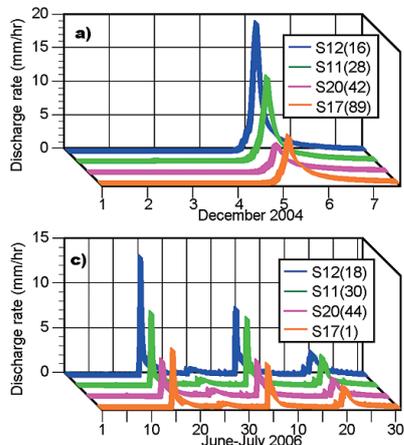


図5 林齢の異なる人工林の来ず初流出の比較 (文献⑥) ()内は林齢(年)を示す。

(6) 未観測流域にも適用可能な連続系モデルの開発に関しては、土壌及び基岩で構成される各透水層の流出に対する地形条件や土壌物理条件の影響、両透水層の相互作用の両方が的確に組み込まなければならないことがわかった(文献⑦)。

(7) 未観測流域における流出機構を推定するためには、空間的に不均質に分布するマクロポアーの効果をもどのように扱うかが非常に大きな難題になっている。そこで、マトリックスポテンシャルがゼロに近い付近で透水係数が大きく変化するようなパラメタリゼーション手法を開発して、圧力水頭・水理水頭の分布に及ぼす影響を理論的に調べた。図6は、降雨強度が増加した場合に、その降雨をどの程度斜面土層が貯留させて流出変動を平準化できるかについて、飽和透水係数やマクロポアーの違いの影響を比べたものである。粘土質の土壌では砂質土壌に比べて平準化機能が小さいこと、マクロポアーは降雨強度の高い範囲に平準化機能をシフトさせることなどの知見が得られた。

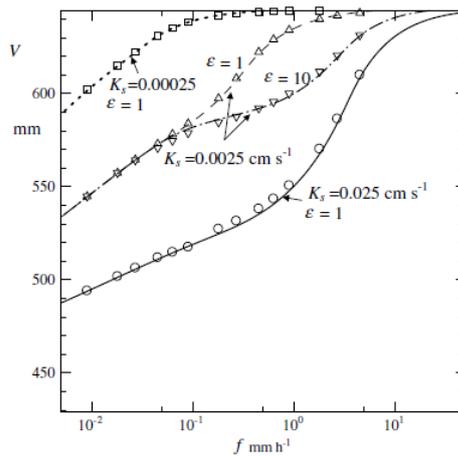


図6 降雨強度の変化(横軸)が斜面土層の貯留量増加(縦軸)に及ぼす影響
 K_s は飽和透水係数(cm/s)、 ϵ はマクロポアーの効果を表す。 K_s 、 ϵ が大きいほど、貯留増加の大きい範囲が降雨強度の大きい側へシフトして行くことが示されている(文献⑤)。

(8) 以上のような野外観測や理論解析に基づき、洪水濁水の予測モデルに関して、次のように検討を進めた。まず、流域水収支において、蒸発散は流出の総量を減少させる役割を持つこと、一方、流出平準化につながる流出における時間遅れは、基岩や土壌などの複数の流出場への雨水の配分とそれぞれの流出場での貯留量と流出量の関係によって決まることという整理を行った。次に、花崗岩と堆積岩の小流域における7つの流出量を

既存の流出モデルである HCYMODEL によってシミュレーションし、最適パラメータを推定した。未観測流域への予測を可能にするためには、それぞれの流域で異なる地形・土壌・植生などの流出場の条件が HCYMODEL の最適パラメータに対応しているのかを明確にする必要がある。そこで、これまで実行してきた観測結果に基づいて流出メカニズムからこの対応を検討した。その結果、花崗岩と堆積岩で流出メカニズムの違い、森林の利用による土壌変化のそれぞれについて、パラメータの変化によって表現することができた (図7)。

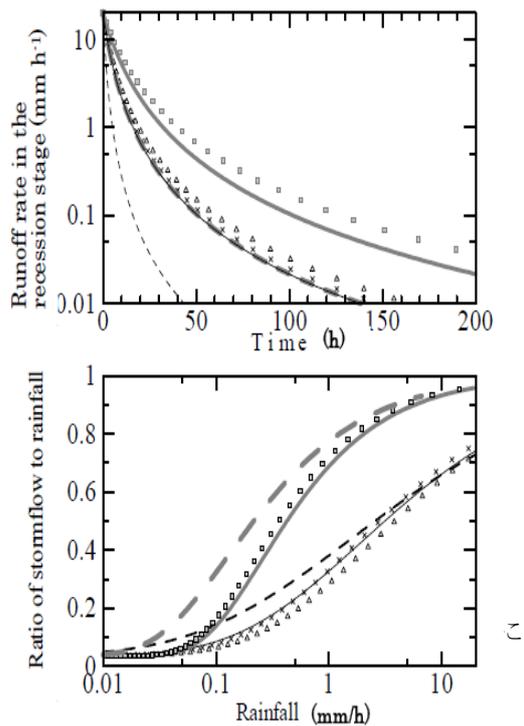


図7 HCYMODEL の適用から推定した、各小流域の洪水流の応答の早さ(上)と土壌層への雨水の配分程度(下)の比較。花崗岩では、はげ山(点線)は応答が早いですが基岩への雨水配分が大きく土壌への配分が少ないこと、堆積岩の森林土壌層が薄い流域(長い破線)は洪水への雨水配分が最も大きいことなどが確認できる (Tani et al., submitted)。

(8) 上記の解析結果から、未観測流域における洪水・渇水の予測に対して、地質毎に基岩・土壌への雨水配分の違いと、土壌における流出応答の早さに基づく時間遅れの違い、さらに蒸発散量による流出総量の違いが影響すること、それぞれを区別して示すことができるようになり、その影響がどの程度かについてもかなり量的に推定できるようになった。

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 20 件)

① Katsuyama, M., Fukushima, K. and Tokuchi, N.: Effects of various rainfall-runoff characteristics on stream-water stable isotope variations in forested headwaters, Eds. by M.

Taniguchi, Y. Fukushima, W.C. Burnett, M. Haigh and Y. Umezawa, From Headwaters to the Ocean: Hydrological Change and Watershed Management, Taylor & Francis. 51-55, 2009. 査読有

② Katsuyama, M., Kabeya, N. and Ohte, N.: Elucidation of the relationship between geographic and time sources of streamwater using a tracer approach in a headwater catchment, Water Resources Research, 45, W06414, doi:10.1029/2008WR007458. 2009 査読有

③ Ohkubo, S., Yokoyama, N., Kosugi, Y., Takanashi, S., Matsuo, N., Tani, M.: Estimating vertical distribution of CO₂ efflux in a temperate cypress forest, Journal of Agricultural Meteorology, 65, 339-348, 2009 査読有

④ Matsumoto, K.: Causal factors for spatial variation in long-term phenological trends in *Ginkgo biloba* L. in Japan, International Journal of Climatology: DOI: 10.1002/joc.1969, 2009 査読有

⑤ Tani, M.: Analysis of runoff-storage relationships to evaluate the runoff-buffering potential of a sloping permeable domain. Journal of Hydrology 360, 132-146, 2008 査読有

⑥ Katsuyama, M., Fukushima, K., Tokuchi, N.: Comparison of Rainfall-Runoff Characteristics in Forested Catchments Underlain by Granitic and Sedimentary Rock with Various Forest Age. Hydrological Research Letters 2, 14-17, 2008 査読有

⑦ Kosugi, K. (5人のうち1番目): Anomalous behavior of soil mantle groundwater demonstrates the major effects of bedrock groundwater on surface hydrological processes. Water Resources Research 44, W01407. DOI:10.1029/2006WR005859, 2008 査読有

⑧ Itoh, M., N. Ohte, K. Koba, A. Sugimoto and M. Tani: Analysis of methane production pathways in a riparian wetland of a temperate forest catchment, using $\delta^{13}\text{C}$ of porewater CH₄ and CO₂. Journal of Geophysical Research; doi:10.1029/2007JG000647, 2008 査読有

⑨堤大三・藤田正治：斜面崩壊過程に与える土層の物理特性の影響に関する検討、水工学論文集 52、565-570、2008 査読有

⑩Fujimoto, M., Ohte, N. and Tani, M.: Effects of hillslope topography and hydrological responses in a weathered granite mountain, Japan: comparison of the runoff response between the valley-head and the side slope. Hydrological Processes 22: 2581-2594, 2008, 査読有

⑪Kosugi, Y. (7人のうち1番目), Tani, M. (5番目).: Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. I. Eddy covariance fluxes and surface conductance characteristics for three years. Journal of Hydrology 337, 269-283, 2007 査読有

⑫ Kosugi, Y., Katsuyama, M.: Evapotranspiration over a Japanese cypress forest. II. Comparison of the eddy covariance and water budget methods. Journal of Hydrology 334, 305-311, 2007 査読有

⑬福井祐介、小杉緑子、松尾奈緒子、高梨聡、谷誠：生育地、生活形態の多様な樹種における水利用様式の比較、水文水資源学会誌 20、265-277, 2007 査読有

⑭Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Hayamizu, K., and Tani, M.: Hydrologic effects on methane dynamics in riparian wetlands in a temperate forest catchment, Journal of Geophysical Research, 112 G01019, doi: 10.1029/2006JG000240, 2007 査読有

⑮Kabeya, N., Katsuyama, M., Kawasaki, M., Ohte, N. and Sugimoto, A.: Estimation of mean residence times of subsurface waters using seasonal variation in deuterium excess in a small headwater catchment in Japan. Hydrological Processes, 308-322, 2007 査読有

⑯Ohkubo, S., Y. Kosugi, S. Takanashi, T. Mitani and M. Tani: Comparison of the eddy covariance and automated closed chamber methods for evaluating nocturnal CO₂ exchange in a Japanese cypress forest. Agricultural and Forest Meteorology 142; 50-65, 2007 査読有

⑰中西理絵・小杉緑子・大久保晋治郎・西田顕郎・小熊宏之・高梨聡・谷誠：温帯ヒノキ林における分光反射指標PRI (photochemical reflectance index) の季節変動、水文・水資源学会誌 19、475-482、2006。

[学会発表] (計 25 件)

Tani, M.: Evaluating an ambivalent effect of slope length on runoff generation using a water storage index. 24th IUGG General

Assembly, Jul. 11, 2007, Perugia. (Italia)
Tani, M.: Analysis of non-monotonic dependency of runoff-buffering potential on the hillslope length using the runoff-storage relationship. 8th IAHS Scientific Assembly, Sep. 9, 2009, Hyderabad. (India)

[図書] (計 2 件)

①谷誠：水の循環における森林の役割、太田誠一編森林の再発見、京大出版、133-184、2007。

②大手信人：水の動きが支配する森林の物質循環、森林水文学編集委員会編：森林水文学、森北出版、212-229、2007。

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.bluemoon.kais.kyoto-u.ac.jp/start-jp.html>

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

サイドル ロイ (SIDLE ROY C.) 京都大学防災研究所・教授、研究者番号 30359781

堤 大三 (TSUTSUMI DAIZO)、京都大学防災研究所・准教授、研究者番号 40372552

大手 信人 (Ohte Nobuhito) 東京大学農学生命科学研究科・准教授。研究者番号 10233199

小杉 緑子 (Kosugi Yoshiko) 京都大学農学研究科・助教、研究者番号 90293919

小杉 賢一朗 (Kosugi Ken'ichiro) 京都大学農学研究科・准教授、研究者番号 30263130

徳地 直子 (Tokuchi Naoko)、京都大学フィールド科学教育研究センター・准教授、研究者番号 60237071

細田 育広 (Hosoda Ikuhiro)、森林総合研究所関西支所・主任研究員、研究者番号 60353843

(3) 連携研究者

勝山 正則 (Katsuyama Masanori)、京都大学農学研究科・産官学連携研究員、研究者番号：40425426

伊藤 雅之 (Itoh Masayuki)、農業環境技術研究所・特別研究員、研究者番号：70456820

藤本 将光 (Fujimoto Masamitsu)、京都大学

農学研究科・特定助教、研究者番号：60511508
大久保 晋治郎 (OHKUBO SHINJIRO)、北海道
農業研究センター・農研機構特別研究員、研
究者番号：80528711
松本 一穂 (MATSUMOTO KAZUHO)、九州大学農
学研究院・特任助教、研究者番号：20528707