

# 分布型流出モデルを用いた佐波川流域における 斜面地中水貯留高と斜面崩壊に関する考察

SUBSURFACE WATER STORAGE AND SLOPE FAILURE

IN THE SABAGAWA RIVER BASIN USING DISTRIBUTED RUNOFF MODEL

田村 隆雄<sup>1</sup>・上杉 明大<sup>2</sup>・武藤 裕則<sup>3</sup>

Takao TAMURA, Akihiro UESUGI and Yasunori MUTO

<sup>1</sup>徳島大学大学院（〒770-8506 徳島市南常三島2-1）

E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp

<sup>2</sup>株式会社レールテック（〒819-0395 大阪市淀川区西中島5-4-20 中央ビル3階）

<sup>3</sup>徳島大学大学院（〒770-8506 徳島市南常三島2-1）

E-mail: muto\_yas@ce.tokushima-u.ac.jp

**Key Words:** distributed runoff mode, subsurface water storage, forest basin, slope failure,  
the Sabagawa river

## 1. はじめに

日本の山地森林域では、台風や前線通過に伴う日降水量が数百ミリを超えるような大雨が誘引となって、斜面崩壊や土石流が多発している。斜面崩壊を発生支配降雨の観点から研究した事例としては、主に崩壊発生時刻の予測を主たる目的として、斜面表層土壤内の飽和浸透過程をキネマティック・ウェーブ法で評価するモデル<sup>1), 2)</sup>や、流域内の雨水貯留高をタンクモデルで表現したモデル<sup>3)</sup>がある。また斜面災害の発生可能性を表す土壤雨量指数を算出するための気象庁のモデル<sup>4)</sup>が実用に供されているが、モデルパラメータは全国一律で、植生、地質等の地域特性や深層崩壊に繋がるような深度の大きな地中水を対象とはしていない<sup>5)</sup>。

著者らは、流域を構成する小流域群を複数のタンクモデルで表した分布型流出モデルを使用して、降雨一流出現象、具体的には降雨波形の異なる複数の洪水ハイドログラフを1組の共通パラメータで再現できるように同定すれば、個々のタンクモデルで推定される地中水貯留高から流域内の地中水の水平分布・鉛直分布を定性的に考察でき、崩壊が発生しやすい小流域の抽出や崩壊様式(表層崩壊、深層崩壊)の予測評価に使用できるのではないかと考えた。そ

して独自に構築した地表面流分離直列2段タンクモデルを組み込んだ分布型流出モデルを用いて、徳島県南部を流れる一級河川・那賀川上流域を対象にし、過去に発生した斜面崩壊と小流域毎の推定地中水貯留高との関連性を考察した。その結果、那賀川上流域では、斜面崩壊が多発した小流域の推定地中水貯留高は流域内でも特に大きくなる傾向を示した。また表層崩壊が発生した小流域では地中水貯留高に占める上部タンク(第1段タンク)の貯水高の比率が大きくなること、深層崩壊が発生した小流域では地中水貯留高に占める下部タンク(第2段タンク)貯水高の比率が大きくなることが分かった<sup>6), 7)</sup>。

この解析手法が汎用的に様々な流域に適用できるのであれば、洪水と同時に斜面崩壊も含めた山地災害の総合リスク評価に繋がる。斜面災害の防止という点では、流域というマクロな視点と発生支配降雨の観点から崩壊しやすい斜面を含む小流域の絞り込みに役立つツールになり得る。流出解析自体は国や自治体によってこれまでに観測、蓄積してきた豊富な水文資料<sup>8)</sup>が利用できるため、比較的安価な手法である。

そこで本論文では、他流域への適用の一例として、平成21年に発生した豪雨で表層崩壊が多発した山口県東部を流れる一級河川・佐波川の中流域を対象



図-1 佐波川中流域

に、那賀川上流域と同様の分布型流出モデルによる流出解析を試み、同流域における斜面崩壊と推定地中水貯留高の関連性を考察した。

## 2. 佐波川中流域と平成 21 年豪雨

図-1 に解析対象とした佐波川中流域と平成 21 年豪雨で発生した斜面崩壊多発箇所、図-2 に地質分布を示す。対象地域は佐波川に設けられた漆尾流量観測所（河口から 24.8km）と新橋流量観測所（河口から 8km）間の流域面積約  $87\text{km}^2$  の領域である。地質は対象地域の中央を流れる佐波川を境に西部は花崗岩が分布しているが、東部は泥質片岩、花崗岩、花崗閃緑岩が分布している。

平成 21 年豪雨は 7 月 19 日から 26 日にかけて活発化した梅雨前線によるもので、総雨量は 310mm（流域平均）を観測した。この大雨により防府市周辺の花崗岩の丘陵地帯の小流域では表層崩壊が多発した。防府市と山口市に発生した崩壊地は大小約 700 箇所において、崩壊面積率は 0.3%～0.4% であった。特に防府市では 7 月 21 日 11:56～12:15 にかけて、真尾、石原、奈美、下右田地区で立て続けに斜面崩壊が多発した<sup>9)</sup>。本論文では図-1 にも示したこの 4 箇所の斜面崩壊多発箇所に注目する。

## 3. 解析手法とモデルの概要

### (1) 解析手法

本研究では地表到達雨量を算出する遮断蒸発モデル<sup>10), 11)</sup>、および小流域の雨水流出過程を表現する地表面流分離直列 2 段タンクモデル（図-3）、及び河道の流下・合流過程を河道側面からの横流入を考慮



図-2 地質分布図

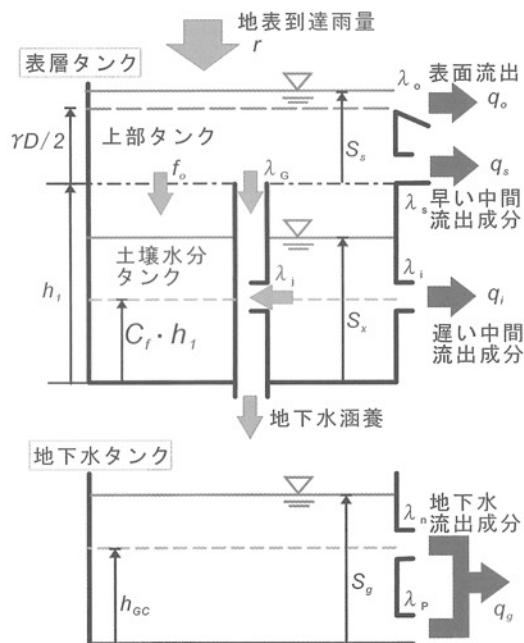


図-3 地表面流分離直列 2 段タンクモデル

した修正 Muskingum-Cunge 法の 3 つのサブモデルを組み合わせた分布型流出モデル<sup>12)</sup>を使用する。モデルの詳細とパラメータ同定手法はそれぞれの参考文献を参照されたい。このモデルを佐波川中流域で観測された水文資料に適用して、発生した斜面崩壊とそれを含む小流域の推定地中水貯留高の関連について議論する。

流出パラメータの同定にあたって、平成 21 年豪雨で表層崩壊が多発した小流域では、植生や土壌の消失等によって、降雨イベント中の降雨－流出過程が斜面崩壊の前後で全く様変わりしている可能性が考えられる。そのため当該降雨イベントの水文資料を使用して、洪水ハイドログラフを再現できるように



図-4 流域分割と斜面崩壊箇所

パラメータを同定しても最適パラメータ組が得られない恐れがある。また本研究で使用するような未知パラメータを多数含むモデルでは、単一の降雨イベントを対象にモデルのパラメータ同定を行っても得られたパラメータや推定された地中水貯留高の信頼性は低いと考える。そこで本論文では、各小流域の流出パラメータを同定するにあたって、まず平成21年以前に発生した複数の降雨イベントで観測された洪水ハイドログラフを再現できるような一組の流出パラメータを探索する。そして決定パラメータで平成21年豪雨の降雨波形を与えて流出計算を行い、地中水貯留高を推定する。流出パラメータの同定に使用した洪水イベントは、平成16年降雨イベント（8月28日～9月2日、総雨量172mm）、平成18年降雨イベント（6月25日～6月29日、総雨量175mm）、平成20年降雨イベント（6月18日～6月22日、総雨量175mm）の3降雨イベントである。これらの降雨イベントの総雨量はいずれも170mm程度と平成21年豪雨の総雨量310mmには及ばないが、いずれも表面流出成分が発生し、タンクモデルに含まれる全てのパラメータの最適解を求めるには十分な降雨イベントだと判断した。

## (2) 森林小流域の地中水貯留高推定方法

本論文では図-3に示した地表面流分離直列2段タンクモデルで推算される地中水貯留高をもとに斜面崩壊について議論する。モデルは表層土壤の雨水運動を表す表層タンクと、地下水層の雨水運動を表す地下水タンクの2つのタンクで構成される。表層タンクは早い中間流出成分と表面流出成分が発生する土壤A層を模した上部タンクと、遅い中間流出成分が発生する土壤B層とC層を模した土壤水分タンクに区分される。

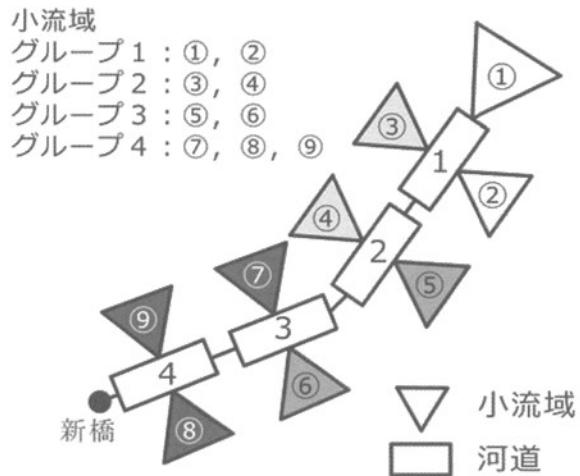


図-5 小流域・河道ネットワーク

表層タンクの水深が有効層厚の1/2を超えると表面流出が発生する。洪水ピーク流量時における最大地中水貯留高（降雨開始時を基準とした地中水貯留高增加分）を以下のように定義する。

$$S_{\max} = \gamma D / 2 + (1 - C_f) h_l + (S_{G\max} - S_{Gini}) \quad (1)$$

ここで  $\gamma D$  : 上部タンクの有効層厚(mm),  $(1 - C_f) h_l$  : 土壤水分タンクの貯留高(mm),  $C_f$  : 土壤水分飽和容量に対する圃場容水量の割合,  $h_l$  : 土壤水分飽和容量,  $(S_{G\max} - S_{Gini})$  : 洪水中における地下水タンクの貯留高の增加分(mm)である。

計算開始時点の貯留高は最大地中水貯留高の推定に影響するので、本研究では森林流域の保水量の過大評価に繋がらないような各タンクの初期水深決定方法を採用する。具体的には計算開始時の河川流量は全て地下水流出成分である ( $Q_{ini} = q_{gini}$ ) と考えて地下水タンク貯留高の初期値  $S_{Gini}$  を与える。土壤水分タンクについては、圃場容水量状態 ( $S_{xini} = C_f \cdot h_l$ ) から計算を開始して降雨開始後直ちに遅い中間流出成分  $q_i$  が発生するようにする。上部タンクの水深 ( $S_s$ ) の初期値は0である。

## (3) モデルパラメータの分布方法と計算条件

佐波川中流域の降雨一流出過程を表現するため、1/25,000 地形図から読み取れる小流域界、及び評価対象とする4つの斜面崩壊多発箇所を参考にして、解析対象流域を9個の小流域と4個の河道に分割した分布型流出モデルを構築した。図-4、図-5に流域分割図ならびに小流域・河道ネットワークを示す。小流域1つ1つの面積は  $4.29\text{km}^2 \sim 14.27\text{km}^2$  とまちまちであるが、タンクモデルを1つずつ割り当てる。河道は、流下計算に修正 Muskingum-Cunge 法を適用できるように、河道両岸に1つずつの小流域が接続するように分割した（河道区間長は  $4.15\text{km} \sim$

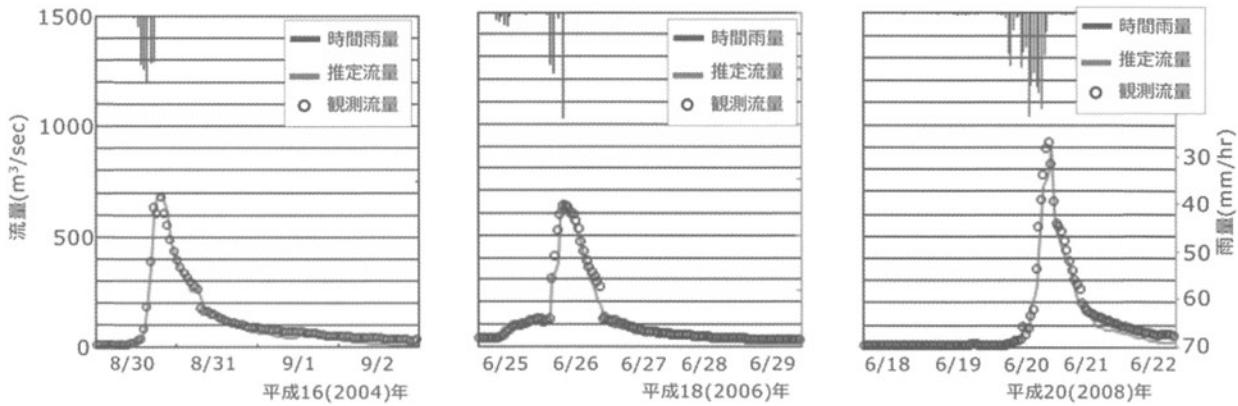


図-6 モデルパラメータ同定に使用した洪水ハイドログラフの再現結果

表-1 各小流域の平均斜面勾配と主なモデルパラメータ一覧表

小流域番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
平均勾配(%)	36	42	38	23	31	30	32	21	23
$\gamma D$ (mm)	61	50	54	65	132	108	70	96	91
$h_1$ (mm)	15	19	17	18	35	32	46	61	58
$C_f$	0.62	0.62	0.53	0.53	0.75	0.75	0.31	0.31	0.31

6.64km). 流出計算にあたっては効率よくパラメータ同定を行うために、図-2の地質図を参考にして図-5のように小流域を4グループ、河道を1グループにまとめ、各グループの平均値を同定する手法を採用した。具体的には各小流域の表層土壌層厚を表すパラメータ( $\gamma D$ )や土壤水分飽和容量( $h_1$ )は小流域の平均勾配に比例して減少・増加すると考えて、同定されたグループ平均値まわりに小流域の勾配に反比例させる方法で決定した<sup>13)</sup>。比例計算に用いる小流域の平均勾配は1/25,000 地形図と等高線延長法<sup>12)</sup>によって求めた。

解析に使用する降雨データは流域内外の4箇所の雨量観測所(野谷、真尾、和田、防府)で得られたものを用いて、スプライン補完法<sup>14), 15)</sup>を適用して求め、更に遮断蒸発モデルを適用して地表到達雨量を得た。モデルの計算時間間隔は洪水の流下速度を考慮して2分とする。解析対象流域からの雨水流出量は新橋観測所の観測流量から漆尾観測所の観測流量を引いたものを使用した。

#### 4. 解析結果と考察

##### (1) 流出パラメータの妥当性

本研究は流域で観測される複数の洪水ハイドログラフを1組のモデルパラメータで表現できれば、そのパラメータセットは流域の流出特性を適切に表現していて、推定される貯留水高から、定性的な流域

貯留水の水平分布(小流域間の貯留水高の大小関係)・鉛直分布(表層水と地下水の大小関係)に関する妥当な情報が得られるという仮定に基づいている。図-6に平成21年豪雨以前に発生した3つの大雨イベントの洪水ハイドログラフ再現結果を示す。再現結果は全て同じモデルパラメータ組で得られたものである。

表-1には、図-3に示したタンクモデルのパラメータや式(1)に含まれる記号のうち、平成21年豪雨で発生した表層崩壊と地中水貯留高の考察に係わる重要なパラメータとして、小流域の平均勾配、上部タンクの有効層厚( $\gamma D$ )、土壤水分タンクの飽和容量( $h_1$ )、土壤水分飽和容量に対する圃場容水量の割合( $C_f$ )を示した。式(1)から上部タンクと土壤水分タンクの最大地中水貯留高は、それぞれ $\gamma D/2$ ,  $(1-C_f)h_1$ で算出できる。

図-6に示したモデルパラメータの同定を行った3つの洪水ハイドログラフの再現結果を見ると、流量増加期から逓減期まで、いずれも良好に再現できていると判断できる。特に最大地中水貯留高が発現するピーク流量時における観測値と計算値の誤差は、平成16年降雨イベントが4.5%, 平成18年降雨イベントが2.1%, 平成20年降雨イベントが4.2%といずれも5%未満と良好である。以上の結果を踏まえて、斜面崩壊と小流域の推定最大地中水貯留高の関係について考察する。

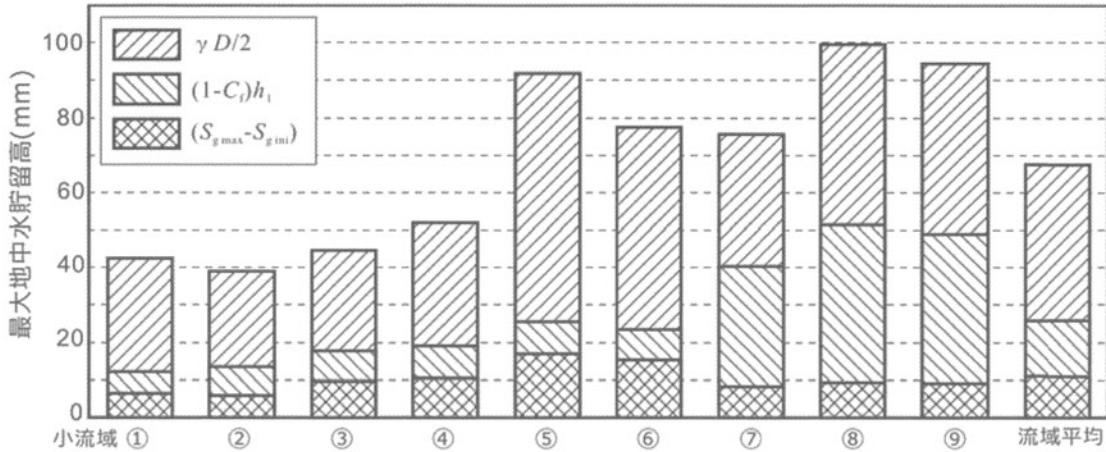


図-7 平成 21(2009)年豪雨における各小流域の推定最大地中水貯留高 ( $S_{\max}$ )

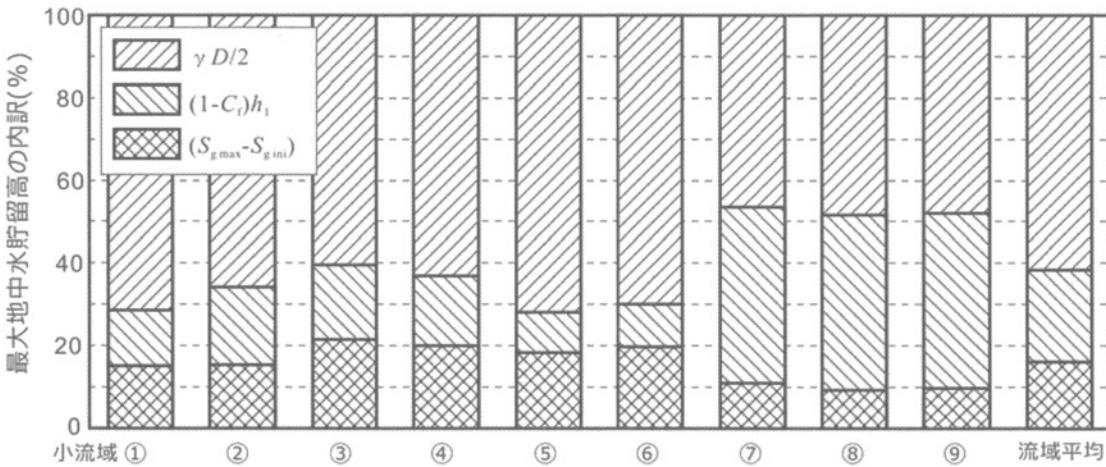


図-8 平成 21(2009)年豪雨における各小流域の推定最大地中水貯留高 ( $S_{\max}$ ) の内訳

## (2) 最大地中水貯留高および内訳と斜面崩壊

図-7 に平成 21 年豪雨で観測された降雨波形を使用してモデルで推定した各小流域の推定最大地中水貯留高と表層水  $\gamma D/2$ , 土壤水  $(1-C_f)h_1$ , 地下水  $(S_{g\max} - S_{g\text{ini}})$  の内訳, 図-8 に推定最大地中水貯留高に各地中水の占める割合 (百分率) を示す。各図において小流域番号①～⑨は図-5, 図-6 の小流域番号と対応する。表層崩壊発生箇所との対応は、奈美が小流域③, 真尾, 石原が小流域⑥, 下右田が小流域⑨である。再現計算において最大地中水貯留高が発生した時刻は 7 月 21 日 12:00 であり、先述したように各地で斜面崩壊が連続して発生した時刻とほぼ一致する。

図-7 から貯水量と表層崩壊の関連性を見ると、真尾, 石原を含む小流域⑥や下右田を含む小流域⑨は 9 つの小流域の中でも特に大きな地中水量が推定されたが、奈美を含む小流域③は流域平均よりも小さい。このことから、佐波川中流域において推定貯留

水高の絶対量や流域内の水平分布から崩壊が発生しやすい箇所を探索することは難しいと考えられる。

図-8 から貯水量の鉛直分布と崩壊との関連性を考察する。表層タンク貯留水と地下水タンク貯留水の比率をみると、全ての小流域で表層タンク貯留水の割合が約 80% を超え、実際の地中水が比較的地面近くに多量に貯留されていたのではないかと推測された。今回の豪雨で発生した 4 つの斜面崩壊多発箇所はいずれも崩壊深さ 1m～2m 程度<sup>16)</sup>の表層崩壊であったことから、モデルで推定される地中水の鉛直分布から斜面崩壊様式を評価できる可能性がある。

下右田を含む小流域⑨と奈美, 真尾, 石原を含む小流域③, ⑥とを比較すると、小流域⑨の地中水貯留高に占める土壤水  $(1-C_f)h_1$  が大きいことが分かる。これには三谷川と佐波川の合流部付近を中心に分布する堆積物の影響が考えられる。三谷川上流に位置する下右田の斜面崩壊をより詳しく考察するためには、小流域⑨の細分化が必要と考える。

### (3) 那賀川上流域の解析結果との比較

表層崩壊と深層崩壊が発生した那賀川上流域を対象にした解析<sup>6,7)</sup>と比較する。この解析では表層崩壊が発生した小流域において、推定最大地中水貯留高に占める表層タンク貯留水の割合は約90%，深層崩壊が発生した小流域でのそれは約30%と顕著な差が見られた。佐波川中流域では表層崩壊しか発生していないが、両流域の解析からモデルで推定される地中水の鉛直分布と斜面崩壊様式には強い関連性があると推察される。

地中水量の大小と斜面崩壊発生箇所という点では、那賀川上流域では崩壊様式に関わらず、斜面崩壊が発生した小流域の地中水量は斜面崩壊が発生しなかった小流域のそれより約60%も大きい傾向が見られたが、佐波川中流域では先述したように顕著な傾向を見ることができなかった。

## 5. 結論

平成21年豪雨で表層崩壊が多発した佐波川中流域を対象にして、タンクモデルを組み込んだ分布型流出モデルで洪水シミュレーションを行い、モデルで推定された流域の地中水貯留高およびその内訳と実際に発生した斜面崩壊の関連性について考察を加えた。その結果、表層崩壊が発生した小流域の最大地中水貯留高に占める表層タンク貯留水の割合は全地中水の約80%以上を占め、那賀川上流域を対象にした解析結果と同様の傾向を示した。つまり地中水の鉛直分布から斜面崩壊様式を評価できる可能性が示唆された。しかしながら、流域内の小流域間の地中水貯留高の分布（地中水の水平分布）では、斜面崩壊発生箇所と小流域の地中水貯留高には明瞭な関係が見えなかった。

今後は深層崩壊が多発した流域への適用や、モデルで推定される地中水貯留高と実際の森林斜面で観測される地下水量との対応関係について研究を進めたいと考えている。

**謝辞：**本研究は平成25年度科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号24560624）の補助を受けました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 平野宗夫：土石流の発生予測と流出解析、土砂移動現象に関するシンポジウム論文集－芦田和男先生退官記念－、pp.23-38、1992.
- 2) 高橋保・中川一：豪雨性表層崩壊の発生とその生産土砂量の予測、第30回水理講演会論文集、pp.199-204、1986.
- 3) 道上正規・小島英司：集中豪雨による崖崩れの発生予測に関する研究、鳥取大学工学部研究報告、第12巻、第1号、pp.167-178、1981.
- 4) Y.Ishihara and S.Kobatake : Runoff Model for Flood Forecasting, Bull.D.P.R.I., Kyoto Univ., 29, pp.27-73, 1979.
- 5) 気象庁、土壤雨量指数、  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/bosai/dojoshisu.html>. 2014.5.9.
- 6) 田村隆雄・岡部健士・江尻雄三郎・新名祐輔・小川健一郎：大規模斜面崩壊が発生した豪雨時における森林斜面の貯水高に関する研究、水工学論文集、Vol.54, pp.511-516, 2010.
- 7) 田村隆雄・能田慎也・武藤裕則：分布型流出モデルを用いた那賀川上流における森林斜面の貯水高と斜面崩壊に関する考察、水工学論文集、Vol.56, pp.469-474, 2012.
- 8) 国土交通省、水文水質データベース、  
<http://www1.river.go.jp/>. 2014.5.9.
- 9) 山口県：災害記録～平成21年7月21日豪雨災害～、  
<http://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a10900/bousai/20090721saigai.html>. 2104.5.9.
- 10) 端野道夫・田村隆雄・田淵昌之・富士川洋一：森林流域における遮断蒸発・蒸散量と流域地中保水量の分離・評価法、水工学論文集、Vol.48, pp.31-36, 2004.
- 11) 元山知範・端野道夫・梅岡秀博：樹冠遮断現象に関する気象要素について、土木学会第58回年次学術講演会、Disk1, II-046, 2003.
- 12) 高瀬信忠：河川水文学、森北出版、pp.13-14, 1978.
- 13) 田村隆雄・端野道夫・橘大樹：一般中小河川にも適用可能な雨量・水位データを用いた流出解析モデルパラメータの同定手法、水工学論文集、Vol.50, pp.350-355, 2006.
- 14) Carl de Boor: A Practical Guide to Spline, Springer-Verlag, 1978.
- 15) 桜井明・吉村和美・高山文雄：パソコンによるスプライン関数、東京電機大学出版局、1988.
- 16) 羽田野袈裟義・朝位孝二・種浦圭輔・兵動正幸・山本晴彦・鈴木素之：2009年7月中国・九州北部の豪雨による土砂災害発生の報告、平成21年度河川災害に関するシンポジウム、pp.1~11, 2010.

(2014.5.9受付)