

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考察

WATER STORAGE OF FOREST SLOPE IN HEAVY RAIN EVENT THAT LARGE-SCALE SLOPE FAILURE IS GENERATED

田村隆雄¹・岡部健士²・江尻雄三郎³・新名祐輔⁴・小河健一郎⁵

Takao TAMURA, Takeshi OKABE, Yuzaburo EJIRI, Yusuke SHINNYO, and Ken-ichiro OGAWA

¹正会員 博(工) 徳島大学 准教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

²フェロー 工博 徳島大学 教授 大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³修(工) 中電技術コンサルタント(株) 河川・環境本部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

⁴学(工) 東海旅客鉄道株式会社 新幹線鉄道事業部 (〒108-0023 東京都港区芝浦4-3-33)

⁵学(農) パシフィックコンサルタンツ(株) 水工技術部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町2-3-13)

In this study, water storage of forest slope estimated from the distributed runoff model was discussed for the heavy rain event that large-scale slope failure was generated. In Typhoon No.10 in 2004, the daily rainfall that became a Japan record was observed in the Nakagawa basin in the east part of Shikoku island, and a lot of large-scale slope failures were generated. Authors think that it is necessary to discuss the flood decrease function of the forest (water storage of forest slope) from the viewpoint of safety in consideration of relativity with the slope failure. Especially, influence that appearance process of amount of the maximum storing water gives to generation of slope failure.

As a result of the discussion, it was guessed that it reached the amount of storing water about 80mm by the accumulation rainfall about 200mm, and the appearance was not related directly to the generation of the slope failure in the Nakagawa upstream basin.

Key Words : *Water storage, Forest slope, Heavy rain event, Slope failure, Distributed runoff model*

1. はじめに

著者らは森林流域の洪水低減機能の定量的評価手法の提案¹⁾や吉野川や岩木川などの実森林を対象にした機能の数量評価^{2),3)}を行ってきたが、それらの研究には大雨によって森林自体は被災せず、機能が損なわれることはないという前提条件があった。しかし現実の日本の森林を見れば、それが形成されている山地の大部分は地質的に脆く、地形的に急峻である。特に四国地域はその傾向が顕著であるとともに台風の常襲地帯でもある。そのため、例えば台風2004年10号(以下、“T200410号”)のように記す)の通過にともなう大雨で、那賀川上流域で大規模な斜面崩壊が多数発生したように、大雨による斜面崩壊もしばしば発生する。

このような事情から、記録的な大雨が発生した場合、シミュレーションで見積もられた貯水高より少ない段階

で斜面崩壊発生にともなう森林表層の喪失により、雨量ピーク時には期待した洪水低減機能が機能しなくなってしまう可能性や、発現した大きな貯水高が仇となって斜面崩壊が発生し、洪水災害に加えて甚大な土砂災害も発生する可能性がある。以上の事を踏まえると、森林流域の洪水低減機能の評価は、単に「どれだけ水を貯められるか」ではなく、「どれだけ『安全に』水を貯められるか」という視点も加えて行う必要があると考える。

そこで本研究では、那賀川上流域において大規模な斜面崩壊が多数発生したT200410号時の大雨イベントに分布型流出モデルを適用して、森林斜面の雨水貯水高の経時変化を推算し、最大貯水高はいくらであったか、最大貯水高にいつ達したのか、を推定するとともに、聞き取り調査から得られた斜面崩壊発生時刻と比較して、期待される貯留能が斜面崩壊によって損なわれなかったか、その逆に、推定された雨水貯留高が斜面崩壊に大きな影響を与えていなかったか、などについて考察する。

2. 対象流域とT200410号時の大雨の概要

長安口ダム流域は、徳島県南部を流れる一級河川・那賀川の上流に位置し、その流域面積は494km²である。日本でも有数の多雨地帯に位置し、年平均降水量は3000mm以上に及ぶ。那賀川本流が東西を貫くように流れ、有力な支流である坂州木頭川が北西から南東方向に流れている。図-1に表層地質図を示す。那賀川本流にはほぼ沿うように仏像構造線が走り、その北側が秩父類帯、南側が四万十帯である。流域全体に多数の断層が存在しているが、特に長安口ダムから沢谷にかけて数多く分布する⁴⁾。流域の大部分はスギの人工林で覆われている。

図-2にT200410号にともなう大雨（7月31日～8月2日）で発生した斜面崩壊地などを示す。海川、小見野々、沢谷を含む東西10km、南北30kmの細長い爪上の地域で、総降水量1,500mm以上を記録し、中でも海川では8月1日に最大時間雨量122mm、日雨量1,317mm（日本記録）を観測した。この大雨により、白石、加州谷では土石流が発生し、大用知、阿津江、海川では斜面崩壊が発生した。大用知の崩壊は特に大規模で、土砂の流下距離2km、比高500m、崩壊幅300mで、崩壊深さは5m程度ないしそれ以下と推定⁵⁾されている。

3. 解析手法とモデルの概要

(1) 解析手法

本研究では、斜面の雨水流出過程を地表面流分離直列2段タンクモデル、河道の流下・合流過程を河道側面からの横流入を考慮した修正Muskingum-Cunge法で表現した分布型流出モデルを使用する。モデルの詳細およびモデルパラメータの同定手法などは田村ら⁶⁾に詳しいので、その説明は割愛する。このモデルを長安口ダム流域で観測された水文データに適用して、ダム流入ハイドログラフを良好に再現できるようなモデルパラメータをもとに、当該流域の森林斜面の貯留能の特徴について議論する。

ところで、T200410号（流域平均雨量1,054mm）では、大規模な斜面崩壊が複数発生した。阿津江地区の大崩壊では坂州木頭川が出水中（8月1日22時頃）に一時的に堰き止められるというような現象もあった。したがってこの時の水文データを使用してモデルパラメータの同定を行うと、流域の雨水流出機構を正しく表現するパラメータが得られない恐れがある。そこで、本論では、まず斜面崩壊などが発生しなかった2003年以前の3つの大雨イベントの水文データを使用してモデルパラメータを同定し、次にT200410号時の降雨波形を与えてダム流入量をシミュレーションし、モデルパラメータの妥当性を検証

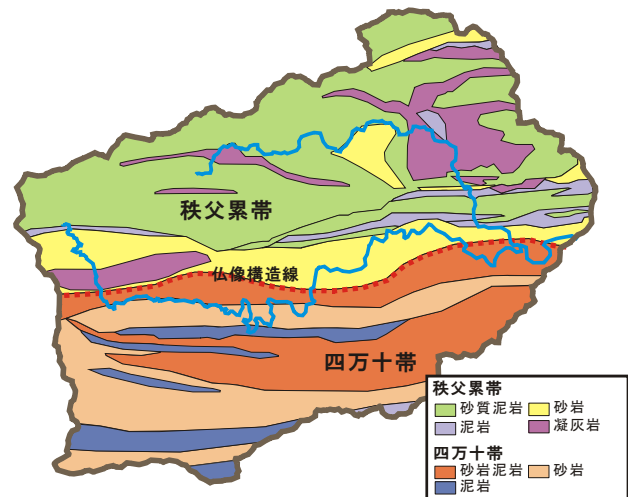


図-1 長安口ダム流域の表層地質



図-2 平成16年台風10号時の斜面崩壊・土石流発生箇所

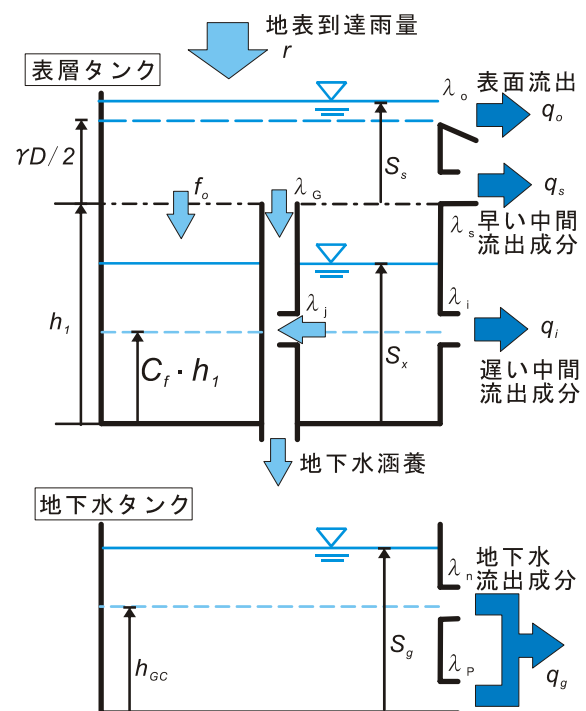


図-3 地表面流分離直列2段タンクモデル

した．パラメータ同定に使用した水文データは，T200215号（流域平均雨量620mm），T200304号（同330mm），T200310号（同575mm）である．

(2) 森林斜面の貯留高の推算方法

本論では，斜面の雨水流出機構を表す地表面流分離直列2段タンクモデルで推算される貯留高の経時変化をもとに森林斜面の貯留能について議論する．図-3にタンクモデルの概念図を示す．モデルは表層土壌の雨水流動を表す表層タンクと，地下水層の雨水流動を表す地下水タンクの2つのタンクから構成されている．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壌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壌B層とC層を模した下部タンクに区分される．

このタンクモデルを用いると，地表面流が発生している時点（時刻 i ）における森林斜面の有効貯留高 S_i は以下のように定義することができる．

$$S_i = S_{s,i} + (1 - C_f)h_i + (S_{G,i} - S_{Gini}) \quad (1)$$

ここで， $S_{s,i}$ ：時刻 i における表層タンク（上部）の貯留高， $(1 - C_f)h_i$ ：表層タンク（下部）の貯留高(mm)， $(S_{G,i} - S_{Gini})$ ：地下水タンクの貯留高増加分(mm)である．

解析では森林斜面の有効貯留高を過大評価しないために，計算開始時の河川流量は全て地下水流出成分である（ $Q_{ini} = q_{gini}$ ）こと，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，表層タンク（下部）の貯留高は，圃場容量に達している（ $S_{xini} = C_f \cdot h_i$ ），という2つの初期条件を設けている．

(3) モデルパラメータの分布手法と計算条件

長安ロダム流域を表現するために，66個の斜面と29個の河道区間からなる分布型流出モデルを作成した．図-4に流域分割図を示す．斜面1つの面積は1.39km²～23.55km²，河道区間1つあたりの長さは1.37km～9.39kmである．使用する分布型流出モデルでは，1斜面につき13個（遮断蒸発に関する1個のパラメータを含む），1河道区間につき5個の同定すべきパラメータがあるので，本来ならば同定パラメータは合計1,003個となる．しかし本研究では，図-2に示した表層地質図を参考に，斜面と河道区間をそれぞれ4つのグループに分けて，同定パラメータを72個に集約した．斜面と河道のネットワークを図-5に示す．斜面について説明すると，第1グループは那賀川本流の最上流域，第2グループは坂州木頭川流域，第3グループは長安ロダムから小見野々ダム間の流域，そして第4グループは海川谷や南川の流域である．

解析に使用する降雨データは流域内外の29個の雨量観測所で得られたデータを用いる．各斜面の雨量は観測雨量データにスプライン補完法を適用して求め，更に遮断蒸発モデル^{1), 7)}を適用して地表到達雨量を得る．モデルの計算時間間隔は洪水の流下速度を考慮して2分とした．



図-4 流域分割

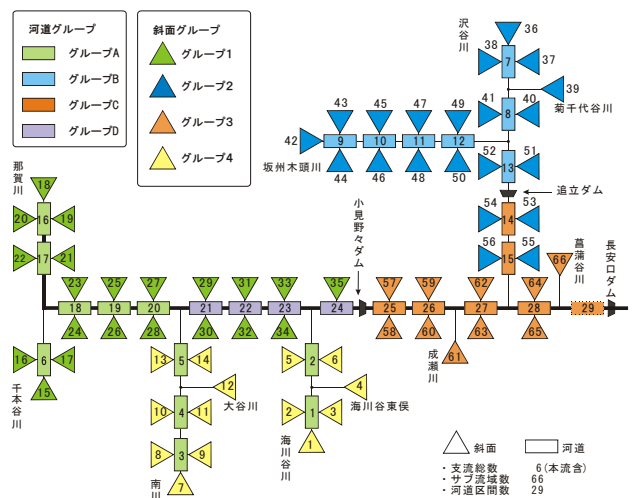


図-5 斜面と河道のネットワークモデル

4. 解析結果と考察

(1) モデルパラメータの妥当性

図-6にモデルパラメータの同定に使用した3洪水のハイドログラフの再現結果，図-7に同定パラメータを用いてシミュレーションしたT200410号のハイドログラフを示す．T200410号では観測値に4つのピークが認められる．モデルによるシミュレーションでは1つめと4つめのピークの再現性が悪いが，8月1日10時に観測された最大流量の誤差が4.7%であることや，ハイドログラフ全体の再現性から，流域の雨水流出機構を良好に再現しうるモデルパラメータを得られたと判断する．

(2) 斜面崩壊が発生しなかったT200310号時の大用知と加州谷を含む斜面の雨水貯留高推定値の経時変化

図-8に斜面崩壊や土石流が発生しなかったT200310号時の，大用知と加州谷を含む森林斜面（斜面52，図-5参照）の雨水貯留高推定値の経時変化を示す．斜面の総雨

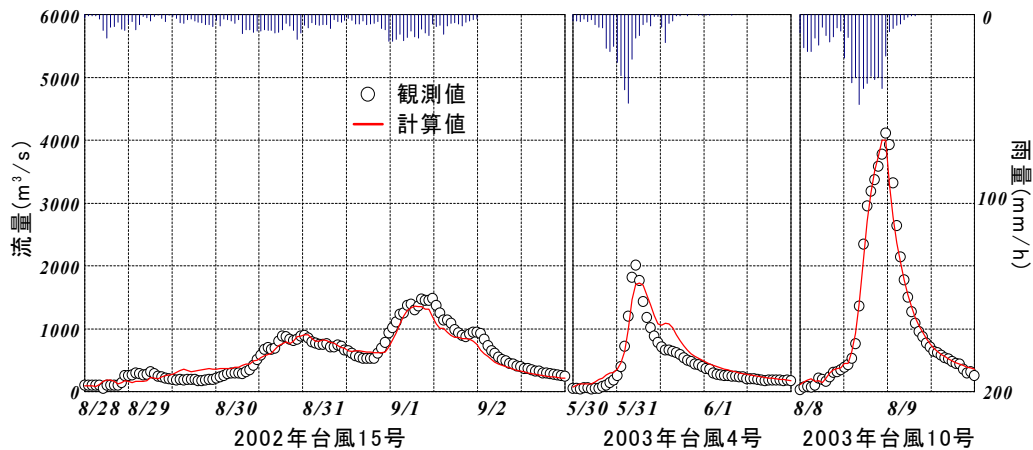


図-6 パラメータ同定に用いた3洪水のハイドログラフ再現性

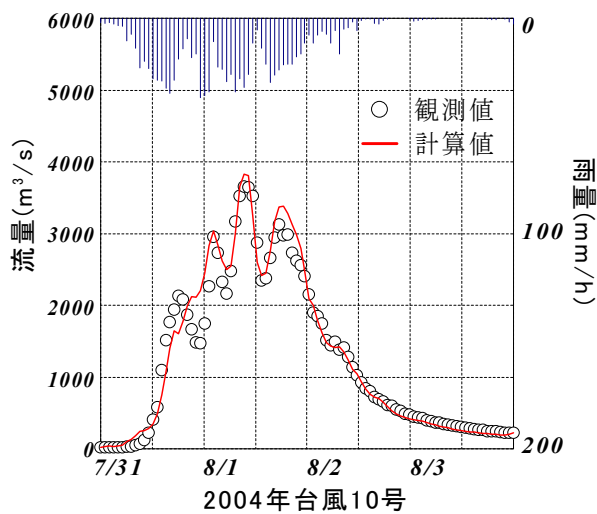


図-7 2004年台風10号時のハイドログラフの再現

量（推定値）は約530mm，最大降雨強度（推定値）は約40mm/hrである．降雨開始からの累計雨量が約270mmに達した時点で，貯留高推定値は最大となり，その値は約80mmであることが分かる．

(3) 斜面崩壊が発生したT200410号時の大用知と加州谷を含む斜面の雨水貯留高推定値の経時変化

図-9に大規模斜面崩壊と土石流が発生したT200410号時の大用知と加州谷を含む森林斜面の雨水貯留高推定値の経時変化を示す．この斜面での総雨量（推定値）は約1,460mm，最大降雨強度（推定値）は約80mm/hrである．図中には最大貯留高となった時刻，および大用知で斜面崩壊が発生した推定時刻（8月1日23時30分頃）も示している．なお加州谷の土石流もほぼ同時刻（2～4時間以内）に発生したと推定⁵⁾されている．この図から，降り始めからの累積雨量が約200mmで貯留高推定値は最大となり，その値は約80mmであると推定されること，その後，降雨強度に変化があるのにも関わらず，降雨終了時まで貯留高は最大で安定していたと推察されること，そ

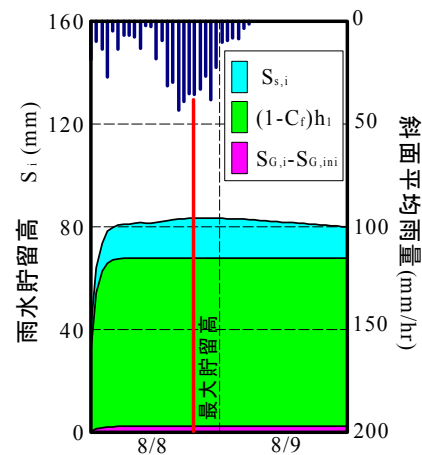


図-8 T200310時の斜面52の雨水貯留高推算値

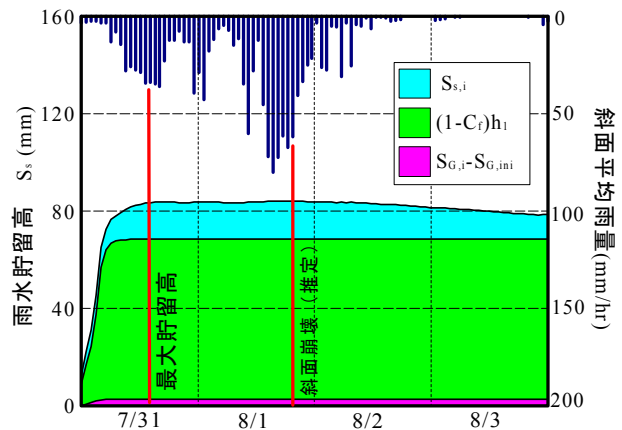


図-9 T200410時の斜面52の雨水貯留高推算値

して斜面崩壊の発生は貯留高推定値が最大となった約30時間後と推測することができる．

(4) T200410号時の流域各所の斜面の雨水貯留高推定値の経時変化

図-10～図-13に，図-5に示した斜面グループ1～4についてT200410号時の雨水貯留高推定値の経時変化を示す．また表-1には土壌中の雨水貯留高の推算に関する3

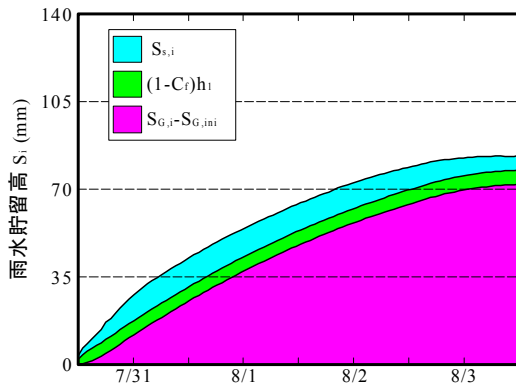


図-10 斜面グループ1のT200410時の雨水貯留高の推算値

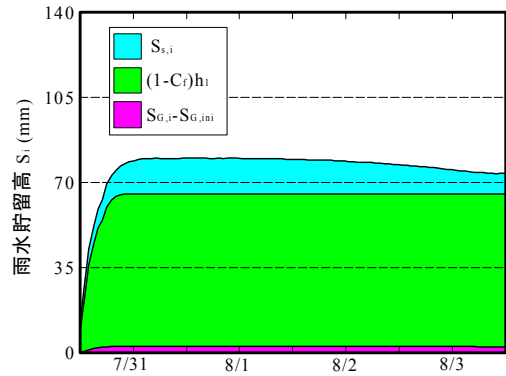


図-11 斜面グループ2のT200410時の雨水貯留高の推算値

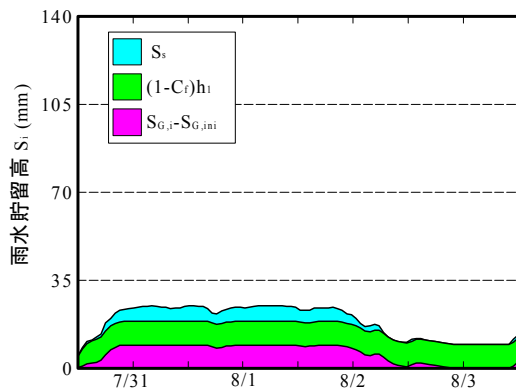


図-12 斜面グループ3のT200410時の雨水貯留高の推算値

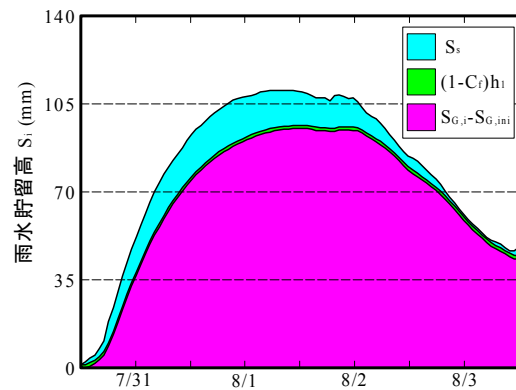


図-13 斜面グループ4のT200410時の雨水貯留高の推算値

つのパラメータ（図-3参照）同定値と地形図から読み取った斜面勾配を示す。これらは各斜面グループの平均的な変化と平均値である。本降雨イベントでは、斜面グループ2と斜面グループ4において、総降水量が1,500mmを超えるような大雨が観測されたが、異なる特徴を見いだすことができる。まず大規模な斜面崩壊や土石流が発生した大用知、阿津江、および加州谷を含む斜面グループ2では、遅い中間流が発生する場と仮定している表層下部タンクの雨水貯留高が全貯留高の約80%（貯留高最大時）を占めることが読み取れる。次に日本記録となる日降水量が観測されたものの、比較的小さな斜面崩壊しか発生しなかった海川を含む斜面グループ4では、地下水タンクの貯留高が全貯留高の約85%（貯留高最大時）を占めていることが読み取れる。

(5) 最大貯留高の発現機構・及び最大貯留高と斜面崩壊の関連性に関する考察

前節(2)と(3)から、2つのイベントの貯留高推定値の最大値が同じとなったことから、大用知と加州谷を含む森林斜面の雨水貯留高の最大値は約80mmであること、また最大値が発現するまでの累積雨量は、降雨強度の影響を受けるものの、およそ200mmであると推定できる。

(3)から、日雨量が1,000mmを超え、最大降雨強度が50mm/hrを超えるような大雨イベントにおいても、大規

表-1 各斜面グループの主なパラメータと斜面勾配

パラメータ	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4
$\overline{\gamma D}$ (mm)	31.54	33.28	17.18	50.56
$\overline{h_i}$ (mm)	33.37	248.49	34.47	5.27
C_f (-)	0.55	0.44	0.39	0.35
斜面勾配	0.77	0.76	0.73	0.74

模斜面崩壊や土石流が発生した大用知・加州谷を含む森林斜面では、斜面崩壊が発生する以前に雨水貯留高が最大に到達していたと推測できることから、少なくとも本流域の森林の洪水低減機能の評価においては、斜面崩壊による機能の損失を考慮せずとも良いと思われる。

(2)と(3)を比較すると、雨水貯留高の最大値はほぼ等しいのに、T200410号時にだけ斜面崩壊が発生している。T200410号時の斜面崩壊は雨水貯留高の最大値が発現して約30時間後に発生していることから、降雨開始数時間後に発現した雨水貯留高最大値が斜面崩壊の直接的な引き金になったとは考えにくい。改めて図-8と図-9を比較すると、T200410号時にはT200310号にはない、2つの特徴を読み取ることができる。1つは最大貯留高の発現が長時間（斜面崩壊まで30時間以上）継続していること。2つめは斜面崩壊が発生する直前に50mm/hrを超える強い降雨が数時間継続したことである。したがって、これら2つの事由が斜面崩壊の発生に大きく関わっているも

のと推察する。斜面の雨水貯留高が最大値に達してもT200310号のように、比較的短時間で降雨イベントが終了する場合には、斜面崩壊には至らないと考える。

(4)から、日降水量が1500mmを超える地域であっても、斜面グループ2では大規模な斜面崩壊が発生し、斜面グループ4では小規模な斜面崩壊しか発生しなかった理由の一端をうかがうことができる。モデル計算から斜面グループ2は比較的浅い土壌層で多量の雨水が貯留されると推察できるので、崩壊深さの浅い斜面崩壊が発生するに至ったというシナリオである。斜面グループ2として設定した坂川木頭川流域には、長安ロダム流域内においても特に数多くの岩質が複雑に混在し、多数の断層が確認されていることから、表層地質の特徴が森林斜面の雨水貯留機構に大きな影響を与えていると推察される。

ところで、長安ロダム流域では1976年9月にも台風にとまなう長雨（日雨量1,114mm、総雨量2,781mm、日早）が観測され、最上流部の新九郎山東斜面や折宇谷など（斜面グループ1、斜面23、25、27）で大規模な斜面崩壊が発生している。このときの崩壊量は100万m³を優に超えていたと推定⁸⁾され、その規模から深層崩壊であったと推察される。モデル計算から、斜面グループ1と斜面グループ4は、共に地下水貯留高の占める割合が大きいという特徴を有すると推察されることから、2004年の大雨が長時間に渡っていれば、海川を含む斜面グループ4の地域でも大きな土砂崩壊が発生していた可能性があると考えられる。

5. 結論

本論文では、分布型流出モデルから得られる斜面の貯留高推定値をもとに、四国東部の那賀川上流域で大規模な斜面崩壊が発生したT200410号にともなう大雨イベントにおける森林斜面の雨水貯留高、その発現機構、および雨水貯留高と斜面崩壊の発生の関連について考察し、以下のような結論を得ることができた。

- (1) 那賀川上流域の大用知、阿津江周辺の森林斜面の雨水貯留高の最大値は約80mmであると推定された。
- (2) 大用知、阿津江周辺の森林斜面の雨水貯留高最大値が発現するまでの降雨開始からの累積雨量は約200mmであると推定された。
- (3) 2004年台風10号で発生した大用知の斜面崩壊は斜面の雨水貯留高が最大に達し、約30時間後に発生したものと推測された。
- (4) 大用知、阿津江周辺の森林斜面の洪水低減機能の評価にあたって、斜面崩壊による機能損失は考慮する必要はないと考えられた。
- (5) 大用知の斜面崩壊は、約30時間の長時間にわたり

雨水貯留高が最大値で継続したこと、その間に50mm/hrを超える強い降雨が数時間もたらされたことが主な原因だと推察された。

- (6) 大用知、阿津江周辺の斜面は、比較的浅い土壌層で多量の雨水を貯留する特徴を有していると推察され、それが崩壊深さの浅い大規模な斜面崩壊の発生の一因になったと考えられた。
- (7) 異なる岩質の混在や断層の存在という地質的要因が森林斜面の雨水貯留能（どの層がその斜面の貯留能を担うか）に関与していることが示唆された。

分布型流出モデルを使って、森林斜面の雨水貯留高や雨水貯留高と斜面崩壊の関係について考察し、現地調査や過去の資料に結びつく興味深い情報を多数得ることができた。このような成果を踏まえて、例えば地盤工学分野との連携をはかり、森林斜面の崩壊メカニズムに関する詳細な考察や、流出モデルを利用した広域的な斜面崩壊予測モデルの構築に発展させたいと考えている。

謝辞：本研究は平成21年度科学研究費補助金（若手(B)、課題番号21760387）の補助を受けて行われたものである。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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、第48巻、pp.31-36、2004。
- 2) 田村隆雄、端野道夫、穴水秀樹、荒木隆夫：吉野川池田ダム上流の森林流域の洪水低減機能に関する定量的評価、水工学論文集、第52巻、pp.379-384、2008。
- 3) 長澤良美、田村隆雄、吉野川上流域における森林の洪水低減機能の評価、土木学会第64回年次講演会講演概要集、Disk1、II-162、2009。
- 4) 国土庁土地局国土調査課監修：土地分類図36（徳島県）復刻版、1992。
- 5) 西山賢一、石田啓祐、村田明広：平成16年台風10号に伴う豪雨で発生した斜面災害の地質的・地形的特徴、平成16年台風災害に関する学術調査報告書、pp.23-31、平成16年台風災害徳島大学学術調査団、2005。
- 6) 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、第50巻、pp.350-355、2006。
- 7) 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。
- 8) 寺戸恒夫：大規模崩壊による山地地形の変化、地理科学、第28巻、pp.17-27、1977。

(2009. 9. 30受付)