

天然ダム水位観測による満水までの雨量推定方法について*

(平成 23 年台風 12 号に関する事例研究)

Estimation of the rainfall causing overflow by use of water level of natural dams
(Case study of natural dams occurred by typhoon No. 12 at 2011)

千葉 幹*¹ 水山高久*²
Miki CHIBA Takahisa MIZUYAMA

1. はじめに

天然ダムが形成された場合、湛水位の上昇度合いの予測は、警戒避難や対策工事の計画・実施にとって重要な情報となる。湛水池への流入量を把握するにあたり、降雨時の流入量の予測が課題となるが、山地斜面における雨水の流出に関しては、これまで、内田(2004)や小杉(2004)が整理するように、パイプ流や岩盤浸透などを考慮する重要性が示されるなど、様々な知見が示されている。これらの成果を踏まえ、天然ダム形成時においても、雨水と流量の関係をより正確に反映して対応することが望ましい。しかし現状では、天然ダム形成地点付近で雨量や流量のデータが蓄積されていない場合や、時間や進入路等の制限があるため天然ダムへの流入量や漏水量などのデータが入手されない場合もあり、雨水と流量の関係を推定し、反映させることは難しい。

平成 23 年台風 12 号により奈良県・和歌山県で天然ダムが発生した。この災害については、砂防学会の「紀伊半島土砂災害調査委員会」(松村ら, 2012)により調査され、近畿地方整備局によりウェブ上で雨量や水位、天然ダムの形状といったデータも公開された。本論では、これらのデータを用い、累積雨量と累積損失雨量の関係を整理することで雨水と流量の関係を推定した。またこの関係を利用して、水位に応じた満水までの累加雨量の推定を試みた。

2. 検討方法

平成 23 年台風 12 号により形成された天然ダムのうち、奈良県の赤谷、長殿、北股、栗平、和歌山県の熊野の各箇所(図-1)について、天然ダム形成後から 10 月末までのデータを用いて検討した。各天然ダムの諸元を表-1に示す。

使用したデータについて、天然ダムの流域面積は 2 万 5 千分の 1 地形図からの読取り、雨量と水位は、近畿地方整備局の記者発表資料に基づく。雨量は、9 月 16 日 5

時から 10 月 7 日 9 時までが既往の雨量計(以下、旧観測所という)で、10 月 7 日 10 時以降は近畿地方整備局が新たに設置した雨量計(以下、新観測所という)で計測された値である。ただし旧観測所の赤谷と長殿はどちらも、各々に各 1 カ所の観測所の計測値が示されるのではなく、赤谷および長殿の計測値が並列して示されていたため、この 2 カ所の観測所の平均値をとって、赤谷、長殿の雨量とした。なお記者発表された期間の前の雨量について、栗平の旧観測所と同じ気象庁の観測所のアメダス雨量データによれば、9 月 1~5 日で合計 1337 mm の、9 月 6~15 日で 0 mm の降水量が記録されている。天然ダムの湛水容量(図-2)は、近畿地方整備局が地上部分はレーザープロファイラ、水中部分は音波探査に



図-1 天然ダム位置図(近畿地方整備局, 2011 に一部加筆)
Fig.1 Location map of natural dams (Partly revising Kinki Regional Bureau, 2011)

表-1 対象とした天然ダムの諸元
Table 1 Scales of studied natural dams

	赤谷	長殿	栗平	熊野	北股
ダム高(m)	85	80	100	60	25
流域面積(km ²)	13.2	4.5	8.7	1.2	0.35
元河床勾配(度)	4.0	3.4	2.4	7.9	8.2

* 本論文の一部は平成 24 年砂防学会にて発表した。*1 正会員 一般財団法人砂防フロンティア整備推進機構 Member, Sabo Frontier Foundation (kikaku@sff.or.jp) *2 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate School of Agriculture, Kyoto University

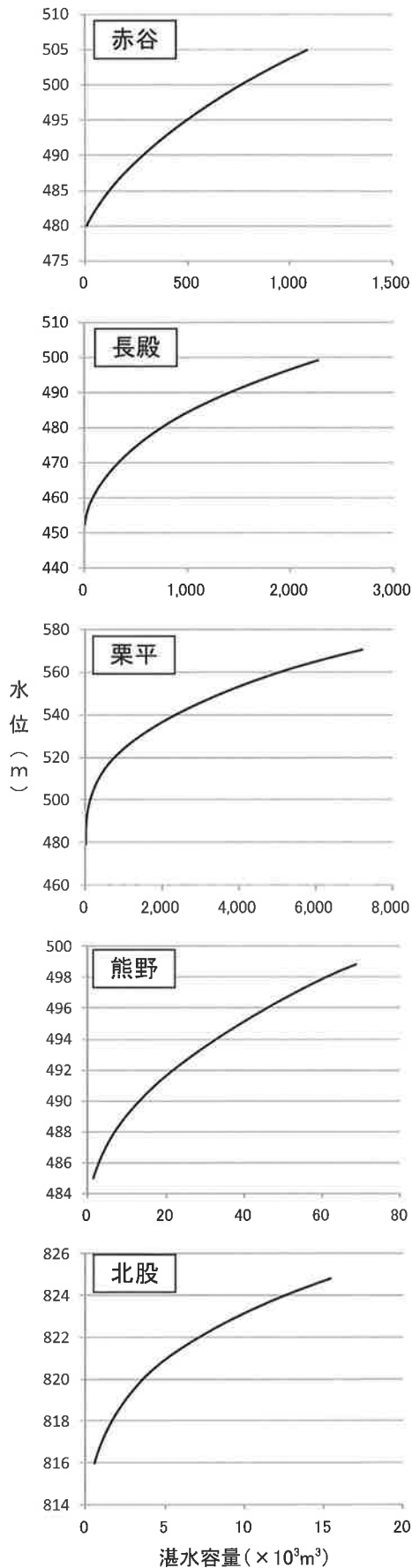


図-2 対象箇所の湛水容量と水位の関係

Fig.2 Relationship between impounded water volume and water level

よって取得した値である。整理した各天然ダムの雨量、湛水位および越流想定水位を図-3に示す。図-3中、越流想定水位が途中で変更された場合がある。

対象とした期間のうち、8つのひと降雨期間（図-3）を各々降雨1~8とした。ひと降雨期間（前後24時間以上降雨が記録されない期間とした）+1日分の湛水量の増加量を、1時間ごとの水位上昇量の和から求め、流域面積で除した。この値と、同じ降雨期間の累加雨量との差を累加損失雨量として整理した。

ここで湛水量への流入量(Q)は、直接流出量(D)と基底流出量(B)および漏水量(L)を用いて以下のように表わすことができると考えられる。

$$Q = D + B - L \dots\dots\dots(1)$$

図-3から無降雨期間の水位変化は、栗平を除き低下傾向にあり、 $Q < 0$ であることから、 $D + B < L$ と推定される。このため降雨期間の基底流量と漏水量が無降雨期間とほぼ同量であると仮定すれば、降雨期間においても $B < L$ が成り立ち、降雨期間の基底流量は漏水量によって相殺されていると推定できる。このため、降雨時の流入量を推定するにあたって基底流出成分を推定し分離する検討は行わなかった。

なお湛水量は標高20cmごとに計測されているが、1.25cmまで内挿して再計算しても熊野の事例で累加損失雨量の差は1mm程度とほとんど結果に影響しなかった。

3. 検討結果

各天然ダムの累加雨量と累加損失雨量の関係を図-4に示す。凡例は流域面積の大きい順番とした。これを損失雨量の割合が10割となったうちの最大累加雨量である34.5mmで区切ってみると、損失雨量の割合は、累加雨量34.5mm以下で平均して9割を超え、それ以上だと平均8割となる。このうち損失雨量の割合が6割未満となったのは、長殿の降雨2、栗平の降雨1および5の3事例のみであった。また今回データを得られたのは最大で累積雨量357mm以下の降雨についてであるが、この範囲で天然ダムごとに切片を0とした直線を当てはめたところ、赤谷を除き、流域面積が小さいほど損失雨量の割合は大きくなった（図-4）。

雨量と水位の関係（図-2）からは、漏水の影響と考えられる水位の継続的な低下を見ることができる。漏水は、天然ダム内部の湛水位より下方の部分で斜面勾配に沿って一様にダルシー則にそって流下していると仮定し、降雨1, 6前の無降雨時における湛水容量の減少分を $\sin\theta$ (θ は元河床勾配)および天然ダムの横断面積(降雨1, 6前時点での水位以下横断面積を近畿地方整備局の記者発表資料より読みとった面積)で除した値を透水係数(cm/sec)として試算した。この結果、求められた透水係数はパイプなどを考慮しない平均的なものであるが常識の範囲内の数値になっている（図-5）。また赤谷では、

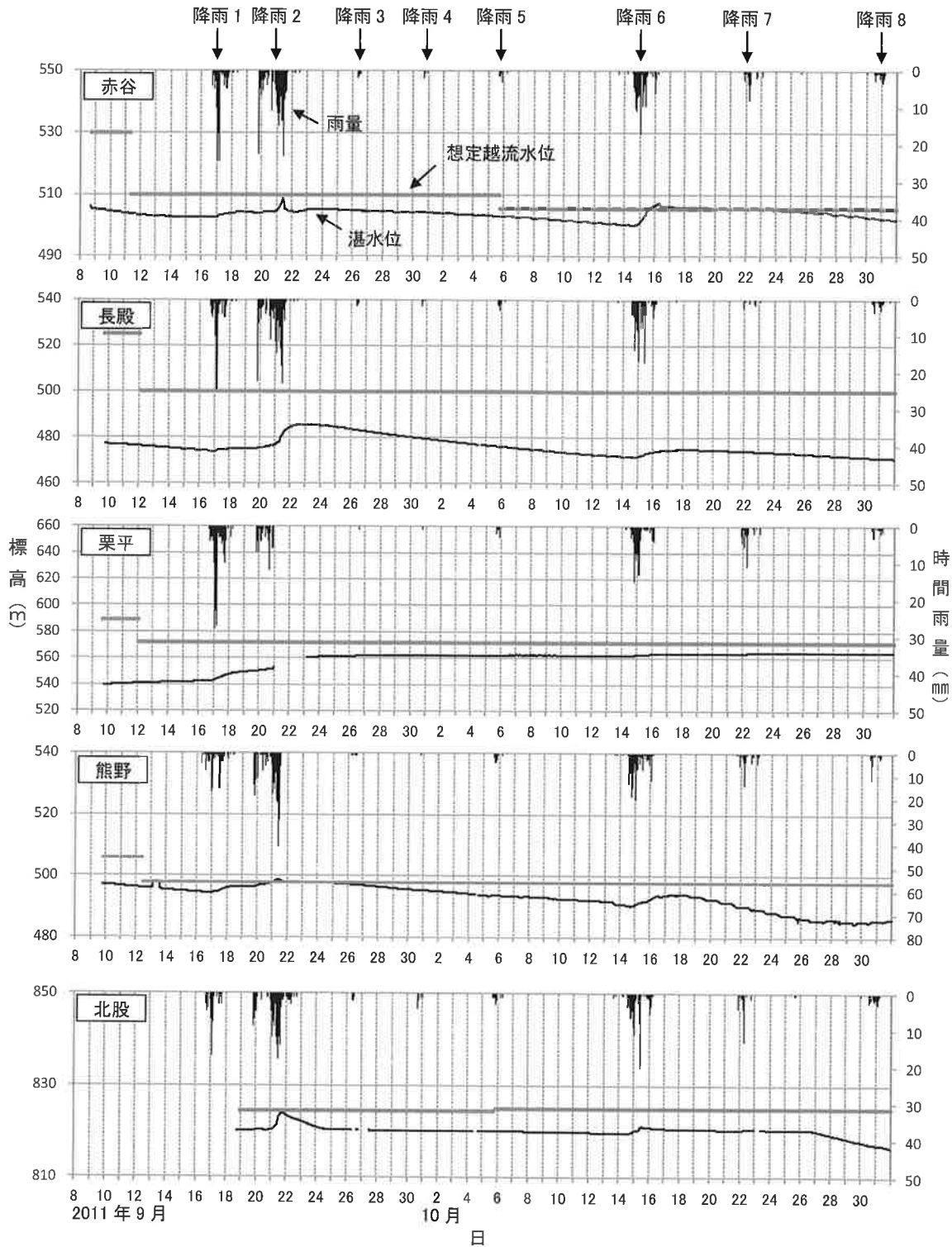
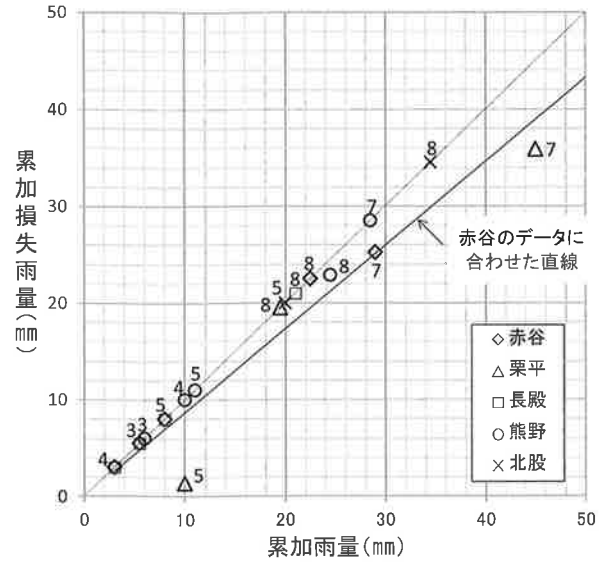
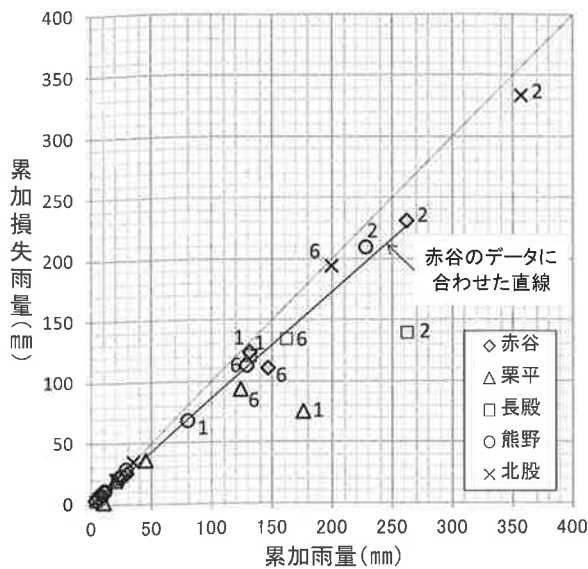


図-3 対象箇所雨量と湛水位、越流想定水位
 Fig.3 Relationship between rainfall and measured water level, estimated overflow level

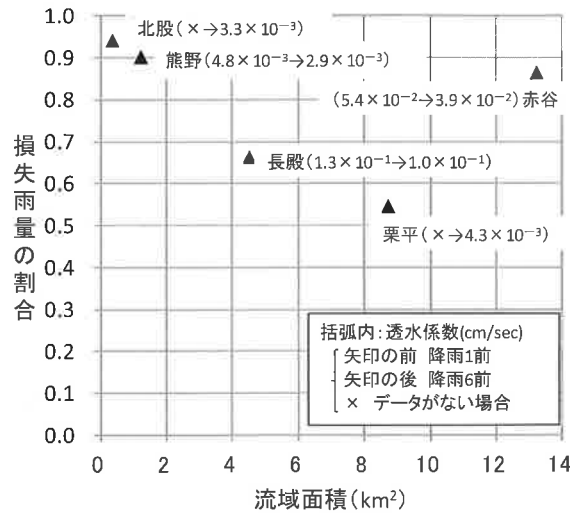
降雨1でほとんど水位が上昇せず、降雨2において一度上昇した水位が急低下する動きが見られた。近畿地方整備局が実施したヘリコプター調査による写真(写真-1)から、天然ダムの堤体上に、降雨1前の9月16日時点ではなかった水たまりが9月18日時点で発生しているのが分かる。またこの9月18日時点の水たまりが、9月19日時点ではやや縮小したようであるが、降雨2中

にあたる9月22日時点の写真では水たまりを經由して下流のり面を伝う水みちとなっていることが確認できる。この期間(9月21日10時~9月22日5時)の水位の低下を越流によるものだとすると、水位低下分から推定される湛水の減少量から、少なくとも約5m³/sの越流があったと考えられる。



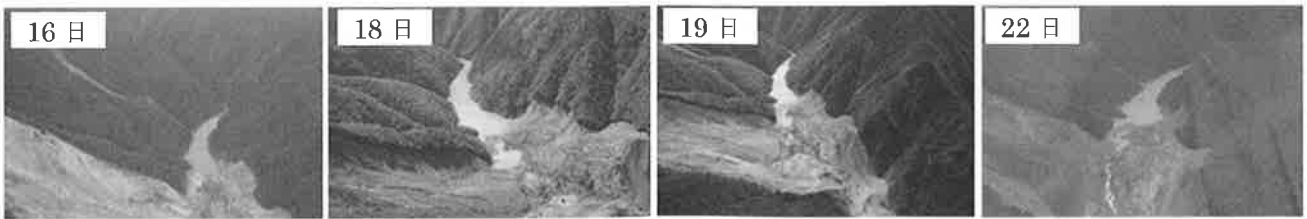
図一四 累加雨量と累加損失雨量の関係（数字は降雨番号。右図は累加雨量 50 mm 以下を取り出したもの。）

Fig. 4 Relationships between cumulative rainfall and cumulative loss (Numbers indicate rainfall numbers. The figure on the right shows a range of less than 50 mm rainfall.)



図一五 天然ダムの流域面積、透水係数と損失雨量の割合の関係

Fig. 5 Relationships between basin areas and coefficient of permeability, percentage of rainfall loss



写真一 2011年9月赤谷における天然ダムの越流状況（近畿地方整備局，2011）

Photo 1 Overflow in Akatani natural dam at Sep. 2011 (Kinki Regional Development Bureau, 2011)

4. 考察

4.1 対象箇所における損失雨量の割合について

今回、損失雨量の割合は 8~9 割と高い結果となった。ここではその特徴をもたらした一因を地質等から考察するとともに、漏水の影響について検討する。

近隣地域における累加雨量と累加損失雨量の関係とし

て、赤谷川流域の約 20 km 上流に位置する大股地点（流域面積；51.4 km²）での過去数年間の水文資料から作成された関係が整理されている（金屋敷，1982）。この関係によれば、初期損失量が 35 mm、累加雨量が 300 mm のとき損失雨量の割合は約 4 割と今回得られた結果の半分程度となる。累加雨量と累加損失量の関係は、流域の土壌、地質、土地利用形態などによって大きく異なり、

最終的な累加損失量は、下層の基岩層の地質特性が強い影響を与えるとされている(塚本, 1995)。この地域は、フィリピン海プレートの沈み込みによって形成された付加体からなり、砂岩や頁岩、チャートなどから構成されている((社)土木学会, 2011; シームレス地質図)。付加体であることと損失雨量の割合の関係は不明だが、大きな圧力を受ける付加体の場合、基盤層の破碎や変形などが流出特性に影響を与える地域もありうると考えられる。

今回、赤谷を除き、流域面積が大きくなるにつれ、損失雨量の割合は低下する傾向があった。藤枝(2007)は、全国52事例、うち14事例が1 km²以上である既往事例について、総降雨量と損失雨量の関係を損失雨量が上限値(以下、最大流域貯留量という)に収束する曲線に近似し、その曲線上の近似値を流域貯留量とした。そのうえで総降雨量300 mmのときの流域貯留量と流域面積の関係を地質別に整理しているが、いずれの地質でも流域貯留量と流域面積の間に明確な関係性は見出せない。一方、佐藤ら(2012)は、全国90の流域の流出率を整理しているが、これを損失雨量の観点から見れば、流域面積30 km²以下の地点では流域面積が30 km²より大きい地点よりも損失雨量が大きくなる傾向があるほか、流域面積が30 km²以上の地点では流域面積が大きくなるにつれ損失雨量が増加する傾向があるといえる。流域面積と損失雨量の関係について、今回はデータ数が少ないことで見かけの関係が出たとも考えられるが、天然ダムが形成されることの多い小渓流では、流域面積の大きい溪流とは異なる特性を持つ可能性があることから、データを蓄積し、その関係を把握する必要性が高いといえる。

また水位の継続的な低下が見られたが、これは漏水によると考えられる。水位は流入量と漏水量の差であることから、水位の変動から漏水分を正確に推定することはできないが、降雨1, 6前の無降雨時における湛水位の低下量を用い、降雨1前の低下が降雨5まで、降雨6前の低下が降雨8まで継続していたと仮定して損失雨量の推定に対する影響を検討した。ただし水位が上昇していた栗平の降雨1前は計算しなかった。この結果、湛水位の低下量は、平均して累加雨量の6%となり、損失雨量の割合に関する全体の傾向に大きな相違は生じない。このことから今回の結果に対し、漏水の影響は小さいと考えられる。

4.2 損失雨量の割合が低い事例について

損失雨量の割合が他より低かった3事例(長殿の降雨2および栗平の降雨1, 5)について、その原因を局地的な降雨、湛水地への崩壊土砂の流入、水位計測上の問題点という3つの観点から考察する。

まず長殿と栗平の降雨1, 2, 6における累加雨量について、今回対象とした雨量計のデータを気象庁による天然ダム流域の流域平均降雨量のデータと比較した。いずれも流域平均降雨量のデータを用いた方が小さく、今回用いた累加雨量と比べて、長殿で約7割、栗平で約8割

となった。このため、局地的な降雨を雨量計で捉えきれなかったために損失雨量の割合が小さくなってしまったとは考えにくい。

さらに湛水地周辺の地盤が崩れやすくなっていると考え、これらが湛水地へ流入したことで水位が上昇し、湛水量の増加を過大に評価した結果、累加損失雨量を過小に算出したと想定した。長殿の降雨2の湛水容量および水位の増加量を見ると、平均が6,251 m³/h, 0.11 mのなか、9月21日8時に89,349 m³/h, 1.78 mと突出しており、損失雨量で20 mm程度の増加に相当する。なお栗平では突出した値は見られない。

雨量と水位の関係(図-3)においては、水位が雨量の変動と関係なく一時間ごとに上昇と下降を繰り返す場合が見られた。流入量や漏水量が変化することで、1時間単位で水位が上下動を繰り返すことは考えにくいことから、水位計のエラーという原因も挙げられる。栗平の降雨5の期間もその場合に該当し、その上下動を相殺すれば、累加損失雨量は累加雨量に等しくなる。ただし、対象とした降雨期間で栗平の降雨5以外にそのような変動が見られたのは、熊野の降雨2だけであった。また今回、一時間ごとの水位上昇量の和を湛水池への流入量とみなしたが、水位低下分の量を除くこととすると、越流の影響があると考えられる赤谷を除き、降雨ごとの累加損失雨量は平均で約3 mm、最大で約10 mm増加する程度であった。

以上より、損失雨量の割合が低い原因として、栗平の降雨5は水位計のエラーが挙げられるものの、長殿の降雨2、栗平の降雨1の原因は明らかでない。

4.3 満水までの累加雨量の推定

各天然ダムの累加雨量と累加損失雨量の関係をを用い、湛水位に応じた満水までの累加雨量の推定を試みる。まず累加雨量をX(mm)、累加損失量をY(mm)とし、各天然ダムの図-4の関係から、それぞれの天然ダムについて、最小二乗法を用い以下の近似式として求めた。

$$Y = a(1 - \exp(-b \times X)) \dots\dots\dots(2)$$

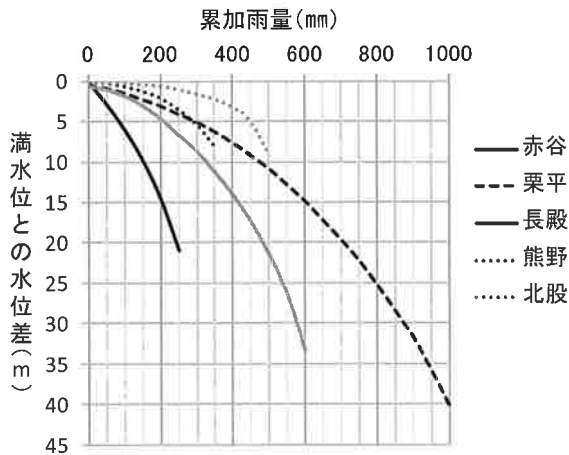
ここでa, bは、各天然ダムについて表-2のように求められた。aは、前述した最大流域貯留量に等しいが、藤枝の示した、200 mm以下が全体の65%、最大値は666.1 mmという結果に比して大きい値が見られた。藤枝は、中小洪水の影響を受け最大流域貯留量が過大に推定されている可能性を示した。本事例においても使用したデータは、9月から10月までという1年間のうちでも限られた期間の降雨を対象としたものであり、その影響を受けていると考えられる。

式(2)を用い、(X-Y)分が天然ダムへ流入する流量と考えると、満水位との水位差に応じ、満水になるまでの累加雨量Xが決まる(図-6)。赤谷で越流が見られた降雨6で見ると、このとき降雨前に満水位まで約5 mであり、満水時までの累加雨量は約130 mmであった。図

表一 累加雨量と累加損失量の関係式における定数

Table 2 Parameters in relations between cumulative rainfall and cumulative loss

	赤谷	長殿	栗平	北股	熊野
a	3588.6	155.5	382.1	2069.0	1438.8
b	0.0002	0.0065	0.0022	0.0005	0.0007



図一六 満水までの水位と累加雨量との関係

Fig. 6 Relationships between cumulative rainfall and overflow level

-6 からは満水位までの水位差 5 m の場合、満水までの累加雨量は約 85 mm と推定された。これは直線に近い場合（千葉，2012）とは逆に安全側とはなるが同程度の誤差を持ち、直線近似の場合と同様、満水までの累加雨量の目安として利用できると考える。ただし、今回はひと降雨期間に対する湛水池への総流入量の関係から満水までの累加雨量の関係を整理したものであり、降雨の状況によっては、降雨期間終了前に水位がピークとなる場合もある。

5. まとめ

今回の結果から、紀伊山地では、損失雨量の割合が大きい地域があることが分かった。その原因として、この地域の地質や流域面積の大小が影響する可能性も否定できない。また累加雨量と累加損失雨量の関係を用いて満水までの累加雨量を推定した。簡易な手法であり、水位の経時変化を追うことはできないが、現状の天然ダム水位に応じ、満水となるおそれのある降雨量の規模を推定するのに利用できると考える。

損失雨量の割合が大きい地域もあることを踏まえると、天然ダムの水位上昇予測に必要なより精度の高い流

出解析を行うためには、入力する有効雨量の算定が重要であると考えられる。従って、平常時から、各地で蓄積されている雨量と流出量のデータを活用し、有効雨量の算定を含む流出解析を実施することが望まれる。

またこれまでに、平成 16 年新潟県中越地震や平成 20 年岩手・宮城内陸地震の際も天然ダムが形成され、土研式投下型水位観測パイなど新たな開発が行われたが、天然ダムへの流入流量は、山間部での計測の難しさもあってか、計測されない場合もあるようである。さらに漏水の影響が想定される天然ダムの場合には、湛水位データだけでは流入流量を正確に把握できない。このため、流入量や漏水量のデータ蓄積を行うべきであると考えられる。

最後に近畿地方整備局をはじめ、データ提供や整理他にてご協力頂いた皆様に感謝申し上げます。

引用文献

- 千葉幹・水山高久（2012）：天然ダムの水位観測による満水までの雨量推定方法について（平成 23 年台風 12 号に関する事例研究），2012 年度砂防学会研究発表会概要集，p. 152 - 153
- 藤枝基久（2007）：森林流域の保水容量と流域貯留量，森林総合研究所研究報告，Vol. 6, No. 2, p. 101 - 110
- 金屋敷忠儀（1982）：山地流域における微細土砂の生産・流出機構と流出予測法に関する研究，京都大学大学院工学研究科博士論文，p. 73 - 104
- 公益社団法人土木学会平成 23 年台風 12 号土砂災害現地調査団（2011）：土木学会平成 23 年台風 12 号土砂災害調査報告書
- 国土交通省近畿地方整備局（2011）：記者発表資料 奈良県五條市大塔町赤谷の水位情報について（平成 23 年 9 月 9 日 0 時 10 分）他
- 小杉賢一郎（2004）：斜面における雨水の浸透・流出過程のモデル化，砂防学会誌，Vol. 57, No. 3, p. 71 - 79
- 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹・海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智（2012）：2011 年 9 月台風 12 号による紀伊半島で発生した土砂災害，砂防学会誌，Vol. 64, No. 5, p. 43 - 53
- 佐藤悠・友村光秀・内田太郎・鈴木拓郎・岡本敦（2012）：全国の山地流域における降雨流出特性の実態，2012 年度砂防学会研究発表会概要集，p. 302 - 303
- 森林水文学編集委員会編（2009）：森林水文学，森北出版，337 pp.
- 塚本良則編（1995）：森林水文学，文永堂出版，319 pp.
- 内田太郎（2004）：近年における山地の土砂移動にかかわる斜面水文プロセス研究の進歩，砂防学会誌，Vol. 57, No. 2, p. 58 - 64
- (Received 15 June 2012; Accepted 27 November 2012)