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 EVALUATON OF FLOOD REDUCTION FUNCTION OF THE FORESTED BASINS LOCATED UPSTREAM IN THE YOSHINO RIVER

田村隆雄¹・端野道夫²・穴水秀樹³・荒木隆夫⁴ Takao TAMURA, Michio HASHINO, Hideki ANAMIZU and Takao ARAKI

1正会員 博士(工学) 徳島大学助教 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学生会員 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)
⁴修士(工学) (株)東京建設事務所 下水道第1チーム (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関3-7-4)

This study evaluates the flood reduction functions of five forested basins of the Yoshino river system covered with Japanese cedar and Japanese cypress. The functions are compared with that of the Meya dam basin covered with beech forest. The distributed runoff model is used, to eliminate the storage effect of the river channel that causes overestimation of the function. The functions of these basins are evaluated by the index of flood reduction function that considers resistance property of surface runoff and storage depth under the ground surface estimated by the model.

The indexes of flood reduction function evaluation of the forested basin of the Yoshino river system are higher than that of the Meya dam basin. The difference between basins appears in the equivalent roughness coefficient of surface runoff in the runoff model.

Key Words : flood reduction function, forested basin, Yoshino river, distributed runoff model, coniferous forest, deciduous broad-leaved forest

1. はじめに

森林流域は荒廃裸地と比較すれば、ピーク流量の低減 や流量ピーク時間の遅延に優れた効果を発揮する.しか し、例えば広葉樹林と針葉樹林ではどのような差異が存 在するのかということについて、定量的な事が分かって いる訳ではない.

一級河川吉野川水系は典型的なスギ・ヒノキ人工林が 広がる. 台風の常襲地帯でもあることから, 流域の洪水 低減機能を高めるために樹種転換を含めた森林整備が話 題に上ることも多い. そこで本論文では, ブナ原生林が 良好な状態で維持されていることから, 洪水低減機能も 高いのではないかと一般的に思われている青森県白神山 地を含む岩木川水系目屋ダム流域を比較対象として, 現 状における吉野川上流域の洪水低減機能の定量的評価を 試みる. 具体的には各流域に分布型流出モデルを適用し, 同一降雨データを与えて推算される流域地中最大保水量 や同定されるモデルパラメータを含む指標値を基にして 各流域の洪水低減機能を比較する.

本研究の特徴は次の2点である.1つめは複数の斜面 と河道からなる分布型流出モデルを適用して、斜面の保 水量のみを抽出して比較する点である.これは河道と斜 面を分離しない集中型モデルを用いると、河道の貯留効 果も含まれ、流域斜面の保水能の過大評価に繋がる可能 性があるためである.

2つめは、地中保水量に加えて地表面流の流れにも配 慮した新たな指標を提案して洪水低減機能の評価を試み る点である。治水計画に用いられるような大雨の場合に は、ピーク流量の殆どは地表面下に浸透できずに流出す る地表面流で構成されることから、地表面下の保水量だ けでは洪水低減機能を十分に議論することは難しいと考 える。そこで本研究ではモデルで推算される保水量にモ デルパラメータの1つである地表面流の流れの抵抗を乗 じた洪水低減評価指標を考案し、洪水低減機能を左右す る森林条件を検討する。

水系	流域名	流域面積 (km ²)	流域平 均勾配	幹線流路長 (km)	主要樹種	地質
吉野川	早明浦ダム	412.0	0.58	47.6		
	富郷ダム	97.6	0.53	17.7		三波川帯(砂質片岩,泥
	松尾川ダム	26.1	0.51	4.5	スギ・ヒノキ	質片岩)
	三縄ダム	347.0	0.56	43.0		
	穴内川ダム	50.8	0.34	10.9		秩父帯 (砂岩,泥岩,凝灰岩)
岩木川	目屋ダム	171.6	0.46	14.2	ブナ	花崗岩が基盤

表-1 解析対象流域の概要

2. 対象流域

(1) 吉野川水系の5つのダム流域

図-1に示す吉野川は、幹川流路長194km,流域面積 3,750km²の一級河川である.本研究では図中に示した富 郷,松尾川,三縄,早明浦,穴内川の5つのダム流域を 対象とする.表層地質は穴内川ダム流域が秩父帯(砂岩, 泥岩,凝灰岩)に属する他は全て三波川帯(砂岩および泥 岩起源の変成岩)に属する.なお三縄ダム・松尾川ダム 流域は全国でも有数の地滑り地帯である.主要樹種はス ギ・ヒノキの針葉樹であり,例えば早明浦ダムにおいて は、スギ・ヒノキの人工林の面積は流域の約80%を占め, 残りが天然広葉樹林となっている.吉野川水系に属する 各流域の諸元を表-1に示す.

(2) 岩木川水系目屋ダム流域

目屋ダムは青森県中津軽郡西目屋村に位置する一級河 川岩木川に建設された多目的ダムであり、ダム周辺に二 次林が広がっているものの、流域南西部の白神山地には ブナ原生林が良好な状態で維持されていることから、吉 野川水系の針葉樹流域の比較対象として好都合である. その流域面積は171.6km²、平均勾配0.46、幹川流路延長 14.2kmである.地質は白亜紀にできた花崗岩を基盤に堆 積岩とそれを貫く貫入岩類からなる.

3. 使用モデルと評価指標,及び計算手順の概要

(1) 地表面流分離直列二段タンクモデル

本研究で使用する分布型流出モデルは市販の地形図を 利用し、分水界に基づいて流域を複数の斜面と河道に分 割して、ネットワーク化したのものである。分割した 個々の斜面をサブ流域、個々の河道を河道区間と定義し ている。サブ流域の雨水浸透・流出計算には、図-2に示 す地表面流直列二段タンクモデル¹⁾、河道区間の流下・ 合流計算には横流入を考慮した修正Muskingun-Cunge法 を用いる。本節ではサブ流域の保水量の推算や、洪水低 減評価指標に使用するモデルパラメータを含む地表面流 直列二段タンクモデルの概要を説明する。河道区間の計



図-1 吉野川水系の概要



算や分布型流出モデル全体のパラメータ同定法等の詳細 は参考文献2)に譲る.

地表面直列二段タンクモデルの特徴は地表面下に浸透 できずに地表面上を流れざるを得ない地表面流と,地表 面下の流れである地中流(中間流+地下水流)とを厳密 に分離できる点で,土壌表層の雨水浸透・流出過程を表 現する1つの表層タンクと地下水層の流出過程を表現する1つの地下水タンクからなる.地表面流については、 飽和地表面流のみを考えて、kinematic wave理論に従う と仮定している.その発生場は斜面全域ではなく、地表 面流出高に応じて増減するものとしている.地表面流出 強度 q_o は表面流出発生領域の平均表層貯留高 S_o が土壤 有効表層厚の半分pD/2を超えると発生すると考え、次 のように表される.

$$q_o = \lambda_o S_o^{\ m} \tag{1}$$

ここで、 λ_o :斜面粗度に関する定数(m=3,層流則)、である.

この λ_o は, 層流則³⁾とManning則を関係づけた次式で 表される⁴.

$$\lambda_o = 2.52 \times 10^{-3} \cdot \frac{I_s^{0.9}}{q_{o \max}^{0.8} (N \cdot L_s)^{1.8}}$$
(2)

ここで、 q_{omax} :地表面流最大流出強度(mm/hr)、

 $N: 斜面表層のManning粗度係数(m^{-1/3} s), <math>I_s: 斜面勾配, L_s: 斜面長(km) である. ここで<math>q_{omax}$ には観測最大降雨 強度 r_{max} を用いる.

(2) 流域地中最大保水量

本研究では、地中水貯留高について、洪水時における 最大値と流出解析開始時の値との差を流域地中最大貯留 高とし、流域地中最大保水量*S*_{max}と定義する. *S*_{max}は、 図-2に示した諸量を用いて次のように表現される.

$$S_{\max} = \gamma D / 2 + (1 - C_f) h_1 + (S_{G\max} - S_{Gini})$$
(3)

ここで、 C_f : 圃場飽和容量に対する圃場容水率、 h_l : 圃場飽和容量(mm)、 S_{Gmax} : 洪水時の地下水最大貯留高(mm)、 S_{Gini} : 流出解析開始時の地下水貯留高(mm) である.

(3) 洪水低減評価指標

ピーク地表面流出発生領域の最大貯留高*S_{omax}*は,式 (1)より地表面流最大流出高*q_{omax}*が既知で,層流則 (*m*=3)に従う場合には,次式で与えられる.

$$S_{o\max} = \left\{ \left(q_{o\max} - Q_{G\max} \right) / \lambda_o \right\}^{l_1/3} \tag{4}$$

ここで、 $Q_{G \max}$:全地中水(早い中間流出 q_s 、遅い中間流出 q_i 、進い中間流出 q_i 、地下水流出 q_G の合計)の最大流出高(mm/hr)である.

この S_{omax} は、実際には地中に入らず地表面上に溢れ ている貯留高で、地表面流最大流出高 q_{omax} の起源とな るものである。治水計画に用いられるような大雨の場合 には、 q_{omax} がピーク流量の殆どを占めると考えられる ことから、洪水低減機能の検討では、地中水流出量の起 源となる流域地中最大保水量 S_{max} と同等に S_{omax} も評 価する必要がある。そこで、式(4)から1/ $\lambda_o^{1/3}$ が地表面

表-2 各流域モデルのサブ流域数と河道区間数

流域名	支流数 (本流含む)	サブ流域 数	河道区間 数
早明浦ダム	5	43	19
富郷ダム	1	7	3
松尾川ダム	1	3	3
三縄ダム	3	32	13
穴内川ダム	1	5	2
目屋ダム	5	50	20

※三縄ダムはその上流の松尾川ダム流域を含む

上に溢れた水の流れにくさを表現していると考えて, S_{max} との積で表される洪水低減評価指標 $S_{\text{max}}/\lambda_o^{1/3}$ を 新たに考える.この指標を用いると、地中保水量に加え て、地表面上に溢れながらも留まっている水量にも考慮 して、森林の洪水低減機能を評価することが可能となる. 具体的には、 S_{max} に関わる土壌有効表層厚や圃場容水 量のような土壌特性に加えて、 $1/\lambda_o^{1/3}$ に関わる地表面 粗度、斜面勾配といった地表面特性が洪水低減機能に及 ぼす影響も検討できる.

(4)計算手順の概要

各流域を表現する分布型流出モデルに含まれるサブ流 域数や河道区間数等を表-2に示す.サブ流域の面積は 1.02km²~24.96km²,河道区間長は1.24km~10.98kmであ る.各流域のモデルパラメータ同定は、吉野川水系では 平成16年台風23号、目屋ダム流域では昭和50年台風5号 で観測された雨量データを適用して、それぞれの観測ハ イドログラフを再現することによって行う.

具体的には、雨量データは各流域内外にそれぞれ数カ 所存在する雨量観測所から得られた雨量データをスプラ イン法により空間分布補完したものを時間単位で与える。 各サブ流域の流量初期値には、流域末端で観測される流 量をサブ流域の面積で比例配分したものを与え、これは 各河道区間に与える流入量初期値にもなる。与える降雨 は1時間データであるが、サブ流域、河道区間の計算時 間間隔は洪水の流下速度を考慮して2分で行った。

以上の操作によって同定された各流域のモデルパラ メータに、平成16年台風23号通過時の早明浦降雨観測所 で得られた雨量データを共通に与えてシミュレーション を実施し、推算されたピーク流量や地中保水量、及び地 中保水量とモデルパラメータから計算される洪水低減評 価指標を使って洪水低減機能の比較検討を試みた.

4. 各流域の洪水低減機能の評価と考察

(1) 分布型流出モデルによる各流域のハイドログラフ の再現結果

図-3に各流域を対象にした分布型流出モデルによる洪水時ハイドログラフの再現結果を示す.流量ピーク時の 観測値とモデル計算値とを比較すると、松尾川ダム流域



|図-4 同一降雨(平成16年台風23号降雨,早明浦降雨観測所)を与えたときの各流域のハイドログラフ

と目屋ダム流域の誤差が目立つ.しかしながらいずれも 10%程度であり、ピーク流量付近の洪水ハイドログラフ の再現性は良好であると認められることから、妥当なモ デルパラメータを得ることができたと判断する.

(2) 同一降雨に対するピーク流出高による比較

複数の森林流域の洪水低減機能を定量評価するには、 同一降雨及び気象条件で流出シミュレーションを行う必 要がある.そこで本研究では、前節でパラメータ同定を 終えた各流域モデルに、平成16年台風23号で観測された、 総雨量が486mm、最大降雨強度が65mm/hrの早明浦降雨 観測所の降雨を一律に与えることにする.そして遮断蒸 発が発生するとした場合と、全く発生しないと仮定した 場合の2種類でシミュレーションを実施する.遮断蒸発 量の算定は著者らが開発した遮断蒸発モデル³⁰を用いる. このモデルでは樹種の差異が考慮される.



図-5 流域地中最大保水量の比較

流出シミュレーションの初期条件としては、地表面流 直列二段タンクモデルの土壌タンク貯留水深 S_x は圃場 容水量の状態(= $C_f h_l$)にあり、中間流出、表面流出は 共に発生していないとし、地下水タンクの貯留水深初期 値(S_{Gini})は、各流域の洪水発生直前に観測された流出 高から逆算して得られた値を用いる.

図-4に各流域の流出モデルに平成16年台風23号降雨を 与えて得られた洪水ハイドログラフを示す.当然である が,遮断蒸発を考慮していない結果(b)が考慮した結果 (a)より大きなピーク流出高を示している.森林の洪水 低減機能を評価するには,遮断蒸発を考慮して検討する ことが理想的であるが,遮断蒸発は樹種の違いだけでな く,樹冠面積,樹齢,および森林整備などの影響を受け る極めて複雑な現象である.本研究では,まず斜面の保 水量を同じ条件のもとで比較することが重要であると考 え,遮断蒸発を考慮せずに得られた結果(b)に基づいて 種々の検討を行う.

改めて図-4(b)を見ると、ピーク流出高が最も大きな 流域は富郷ダム流域であり、以下、穴内川ダム流域、目 屋ダム流域、早明浦ダム流域、松尾川ダム流域、三縄ダ ム流域の順で、最も小さな三縄ダム流域でさえ30mm/hr を超えている.同定されたモデルパラメータ^のから計算 されるピーク流量時における地中流(早い中間流+遅い 中間流+地下水流)は、同流域で3mm/hr程度と見積も られることから、流量のほとんどは地表面流出で占めら れていると容易に推察できる.

この推算流量は分布型流出モデルから得られた流域末 端における値で、河道の貯留効果の影響も含まれている ことから、この図では斜面部の洪水低減機能を厳密に評 価することはできない.また早明浦ダム流域など吉野川 水系に属する針葉樹林流域と目屋ダム流域(落葉広葉樹 林)を比較しても明瞭な違いは現れていない.



(3) 流域地中最大保水量による比較

図-5にシミュレーションで得られた各流域の流域最大 地中保水量*S*_{max} とその内訳を示す.最も*S*_{max} が大きい のは三縄ダム流域で,前節で示したピーク流出高とはお およそ逆の順序となった.

図から S_{max} には $pD/2 \geq (1-C_f)h_1$ が大きく寄与して おり、特に表層土壌の有効層厚pDと土壌水分飽和容量 h_1 の影響が大きいと判断できる.地表面流や早い中間 流が発生する表層土壌は、落葉落枝や分解する微生物の 量が影響するため、その保水量は生態系豊かな落葉広葉 樹林の方が大きいという意見もあるが、落葉広葉樹林の 目屋ダム流域の保水量 $((pD/2)+(1-C_f)h_1)$ は、針葉 樹林である吉野川水系の流域のそれと比べ、概して小さ く推定された.三縄ダム流域と松尾川ダム流域のpD/2 $\geq (1-C_f)h_1$ は、吉野川水系の中でも特に大きく見積も られているが、これは当該流域が全国でも有数の地滑り 地帯であることと関連している可能性がある.地下水タ ンクの最大貯留高($S_{\text{Gmax}} - S_{\text{Gini}}$)は、目屋ダム流域が 最も大きく、これは地質構造(断層、節理、傾斜方位な ど)の差異が原因と考えられる.

(4) 洪水低減評価指標による比較

図-6に、流出シミュレーションにおいて得られた全サ ブ流域のピーク洪水流出率 Q_p/R_p と洪水低減評価指標 $S_{\text{max}}/\lambda_o^{1/3}$ をプロットしたものを示す.本指標が大きく なるほどピーク洪水流出率が小さくなっていることから、 本評価指標によって森林流域の洪水低減機能を評価する ことが可能であることが分かる.また本指標を用いた場 合、洪水低減機能が高いのは三縄ダム流域と松尾川ダム 流域であり、続いて穴内川ダム流域、早明浦ダム流域、 そして目屋ダム流域と富郷ダム流域となる.以上から本



研究で使用した分布型流出モデルのモデルパラメータを 用いた洪水低減評価指標の妥当性が示されたと判断する. そこで,洪水低減評価指標 $S_{max}/\lambda_o^{1/3}$ の中の地表面抵 抗 $1/\lambda_o^{1/3}$ について検討する.式(2)より、 $1/\lambda_o^{1/3}$ を縦 軸に、N、L_s、I_sを横軸にして各流域の平均値をプ ロットしたものを図-7~図-9に示す.Nと $1/\lambda_o^{1/3}$ に比 ベ、L_sと $1/\lambda_o^{1/3}$ 、I_sと $1/\lambda_o^{1/3}$ には相関性が殆ど見ら れないことから、地表面粗度Nが地表面抵抗 $1/\lambda_o^{1/3}$ に 最も大きく寄与しており、ピーク洪水流出率を小さくす る方向に作用していると判断できる.具体的に述べると、 図-7よりスギ・ヒノキ林からなる三縄ダム流域の地表面 粗度は、ブナ林の目屋ダム流域より5.5倍も大きく見積 もられ、主要樹種の差異が地表面抵抗の差異として反映 されている可能性がある.

5. まとめ

吉野川上流に位置する5つのスギ・ヒノキ人工林で覆 われる森林流域の洪水低減機能をブナ原生林で覆われる 目屋ダム流域のそれと比較検討した.具体的には各流域 を分布型流出モデルで表し、流域地中保水量を遙かに上 回る降水量や降雨強度が観測された降雨データを同様に 与えて、推算されるピーク流量、流域最大保水量、及び 本研究で提案した洪水低減評価指標で比較を行った.以 下に結果と知見をまとめる.

- (1) 吉野川水系に属する5つのスギ・ヒノキ森林流域と 岩木川水系の1つのブナ森林流域に分布型モデルを 適用し、それぞれ平成16年台風23号、昭和50年台風 5号降雨を対象にして、洪水ハイドログラフの再現 を行い、ピーク流出高について10%以内の精度で再 現できるモデルパラメータを得た。
- (2) パラメータ同定後の各流域モデルに平成16年台風23 号で観測された早明浦降雨観測所の降雨データを一 律に適用し、ピーク流出高を比較した.しかし樹種 の違いと判断できるような差異は現れなかった.例

えば早明浦ダム流域のピーク流出高は目屋ダム流域 のピーク流出高とほぼ同じ結果となった.

- (3) 推算された各流域の流域地中最大保水量にも樹種の 影響を読み取ることはできなかった.流域地中最大 保水量には、表層土壌の有効層厚や土壌水分飽和容 量が大きく寄与していることが示唆された.
- (4)本研究で提案した洪水低減評価指標を用いた評価から、ピーク流量の殆どを占めると考えられる地表面流の流れの抵抗要因は地表面粗度であり、その中に 樹種の差異が反映されている可能性がある.
- (5) (2)~(4)から、スギ・ヒノキ人工林からなる吉野川 上流域の森林流域の洪水低減機能は、ブナ天然林の 目屋ダム流域と同等以上であり、主要樹種の差異と 洪水低減機能の大小が必ずしも直結するものではな いことを確認することができた。

謝辞:吉野川上流域の森林資源の現況等に関する貴重な 資料を御提供下さいました高知県森林局,ならびに徳島 県農林水産部の各位に心より御礼申し上げます.

参考文献

- 端野道夫,田村隆雄,田淵昌之,冨士川洋一: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,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.
- 3) 端野道夫:山地小試験流域の降雨流出解析,水理講演会論 文集,第26巻, pp.183-189, 1982.
- 端野道夫:森林の洪水低減・渇水緩和機能とその定量評価法,水工学シリーズ05-A-4,土木学会,2005.
- 5) 元山知範,端野道夫,梅岡秀博:樹幹遮断現象に関する気 象要素について、土木学会第58回年次学術講演会概要集, II, pp. 91-92, 2003.
- 6) 荒木隆夫:吉野川池田ダム上流域における森林の洪水低減 機能評価,徳島大学大学院修士論文,2007.

(2007.9.30受付)