

遮断蒸発率と地表面粗度の増強による森林の洪水低減機能の早期向上に関する検討

田村 隆雄¹・上田 尚太郎²・武藤 裕則³・鎌田 磨人⁴

¹正会員 博士(工学) 徳島大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp (Corresponding Author)

²学生会員 徳島大学大学院創成科学研究科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
E-mail: c612031007@tokushima-u.ac.jp

³正会員 Ph.D 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
E-mail: muto_yas@ce.tokushima-u.ac.jp

⁴正会員 学術博 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
E-mail: kamada@ce.tokushima-u.ac.jp

流域治水における活用を念頭に、遮断蒸発率と地表面抵抗の増強による森林の洪水低減機能の向上について洪水ピーク流量の視点から検討した。徳島県内に位置する2つの林地(一斉植林・皆伐型施業のスギ人工林, 弱間伐・択伐型施業のスギ・ヒノキを中心とする針広混交複層林)を対象に水文観測を実施し, 地表面流分離直列二段タンクモデルと将来予測降雨を用いた流出シミュレーションを実施した。遮断蒸発率と地表面抵抗の洪水ピークの流量低減と遅延効果について検討した結果, 対象としたスギ人工林を針広混交複層林・弱間伐に変更すると20%程度の洪水ピーク流量低減効果を得られる可能性が示唆された。

Key Words: Forest, Flood reduced function, Evaporation, Ground roughness, Basin flood control

1. はじめに

地球温暖化や異常気象によって各地で洪水が激化しており流域治水の導入が図られている。具体的手法の1つとして森林整備による洪水流量の低減が検討されているが, 河川整備計画の目標年限(20~30年程度)で森林の機能を向上させることは非常に困難とみなされ, 積極的に採用される事例はほとんどないと思われる。

一般に森林の洪水低減機能は, 空隙に富む森林土壌がその中心的役割を担い, 洪水ピーク流量の低減と発現時間の遅れに効果を発揮すると考えられている。しかし計画規模の洪水ではピーク雨量に達する前に土壌が飽和する等のために効果はほとんど期待できない¹⁾。また土壌層厚の増加速度は0.05~0.2 mm/year程度²⁾で, 洪水流量低減効果が表れるのに100年単位の時間を要する³⁾。したがって土壌層を改善することで森林の洪水低減機能向上を図ることは極めて困難だと考える。

しかし樹冠部が有する遮断蒸発作用は地表到達雨量そのものを減少させ, 降雨開始時から終了時まで継続する⁴⁾ことや, 洪水ピーク流量の主成分となりうる地表面

流の斜面流下速度は森林表層土壌の抵抗を受ける⁶⁾ことから, 樹冠部の遮断蒸発率と地表面の粗度を改善することによって, 大洪水時にもピーク流量の低減を期待できる可能性があると考ええる。また遮断蒸発率に関わる立木密度や樹冠構造, 地表面粗度に影響する林床植生量や地表面の凹凸度は森林施業によって比較的容易かつ短期間で調整可能であり, 土壌の改善より現実的である。

そこで本研究では, 四国の一般的なスギ人工林(一斉植林・皆伐, 強間伐)を代表として徳島県白川谷森林試験流域と, スギ・ヒノキ林に広葉樹を積極的に残した施業方法(択伐, 弱間伐)を取り入れた針広混交複層林の橋本林業地を対象にして, 遮断蒸発率および地表面粗度が洪水ピークの流量と発現時間に与える影響を考察するとともに, 白川谷森林試験流域を橋本林業地の施業法に変更した場合に期待できる洪水ピーク流量低減効果を推算する。なお, 流域治水への適用可能性の検討に資するために, 近年ますます激化する大雨を考慮して, 地球温暖化予測情報第9巻⁷⁾をもとにして作成した将来降雨確率雨量を用いた流出シミュレーションを実施した。

2. 対象林地と水文観測

徳島県白川谷森林試験流域（以下、白川谷）と橋本林業林地（以下、橋本林地）の位置を図-1、林地の主な諸元を表-1、林内の代表的様子を写真-1と写真-2に示す。

白川谷は吉野川水系白川の最上流に位置する面積23haの林地で、流域上流部2/5は天然広葉樹林、下流側斜面部3/5はスギの人工林である。スギの間伐率は30%程度である。年間降水量は約2,800mmで水文観測は1988年～1998年に実施された。林外雨量の観測には流域外の上空の開けた林道脇に設置した0.5mm転倒マス型雨量計を用いた。樹冠通過雨量の計測には林内の林床に設置した水平射影面積7.2m²の集水板と500cc転倒マス型量水計を使用した。渓流水位と流量の計測は流域末端に設置した流量堰を使用した。

橋本林地是那賀川水系白ヶ谷川に位置する面積110haの民有地で1979年から高密度作業道の整備、長伐期択伐施業を特徴とする自伐林業が実施されている。林内は様々な樹齢のスギ、ヒノキにモミ、ケヤキ、シイ等300種以上の植種が混じる針広混交複層林が形成され、林床付近もコジヤアラカシ等で覆われている。スギ・ヒノキの間伐率は15%～20%である。低コストな林業経営と大雨による土砂崩壊に強い林地を実現させたことが評価され、2016年には内閣総理大臣賞と農林水産大臣賞を受賞した。流域治水に組み込むモデル林地になりうると思われる。年間降水量は約3,500mmで、林地内の12haの集水域を対象にして林外雨量や樹冠通過雨量、渓流水位等の観測を2017年から実施している。林外雨量の観測には集水域外にある上空の開けた場所に設置した0.2mm転倒マス型雨量計を用いた。樹冠通過雨量の観測には林内の3か所に設置した水平射影面積1.0m²の集水板と500cc転倒マス型量水計を使用した。流域末端の溪流で水位の連続観測を行っている。

3. 研究手法

(1) 遮断蒸発率の推定方法

遮断蒸発率は、任意の降雨イベントにおいて観測された林外雨と樹冠通過雨の時間雨量を式(1)に適用して、降雨イベントの平均値として算出する。

$$I_{ave} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i - r_{t,i}}{r_i} \quad (1)$$

ここで、 I_{ave} ：平均遮断蒸発率、 r ：林外雨量(mm/hr)、 n ：樹冠通過雨量(mm/hr)、 i ：時刻、 n ：雨量観測時間数(個)である。

橋本林地では樹冠通過雨量を3カ所で計測しているのので、その平均値を林地の遮断蒸発率とする。なお遮断蒸発率は降雨イベントによって変動するが、本研究では地

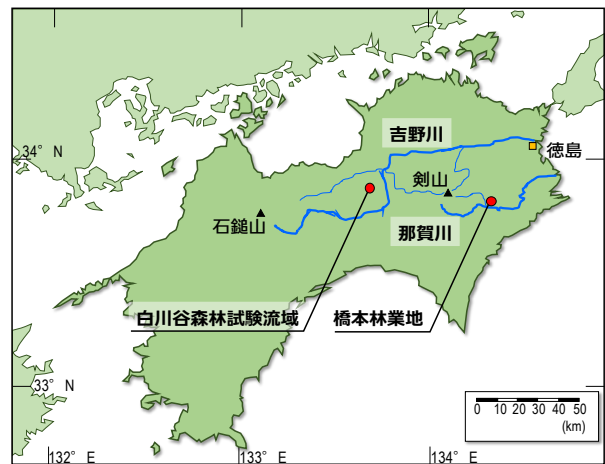


図-1 対象林地の位置

表-1 林地の諸元

	白川谷	橋本林地
面積	23ha	12ha
標高	740m～1140m	350m～660m
流域平均勾配	0.87	0.74
平均斜面長	0.67	0.17
植生	針葉樹林 (スギ)	針広混交林
地質	砂質片岩・泥質片岩	砂岩・泥岩



写真-1 白川谷林内

写真-2 橋本林地林内

表面流が発生するような洪水を対象とするので、観測降雨イベントのうち総雨量の大きいものを10個選択し、その平均値を林地の代表遮断蒸発率とした。また遮断蒸発率の算定に樹幹流量を加味していないが、これは林外雨量に対する樹幹流量の割合は10%未満と見積もられ8.9%など、影響は小さいと判断したためである。

(2) 地表面粗度の推定方法

流域の平均的な地表面粗度の計測は困難である。そこで、図-2に示す地表面流分離直列二段タンクモデルに採用されている表面流低減係数 λ_0 を定義する式(2)に着目し、それに含まれる地表面粗度 N （表面流の斜面流下速度を遅らせ洪水ピークの遅れをもたらすパラメータ）を流域の代表値と考え、次節で述べる実洪水データを使ったパラメータ同定手法により推定する。

$$\lambda_0 = 2.52 \times 10^{-3} \frac{I_s^{0.9}}{r_{max}^{0.8} (N \cdot L_s)^{1.8}} \quad (2)$$

ここで、 λ_0 : 表面流低減係数(hr), I_s : 地形図より求めた流域の平均斜面勾配, r_{max} : 地表面流最大流出強度として代用する最大観測降雨強度(mm/hr), N : 地表面粗度($m^{1/3} \cdot s$), L_s : 地形図から求めた流域の平均斜面長(m)である。タンクモデルや式(2)の詳細は参考文献 10)を参照されたい。

(3) 地表面流分離直列二段タンクモデルのパラメータ設定方法

地表面流分離直列二段タンクモデルには水位・流量変換モデルが組み込まれており、地表面粗度 N を含む未知パラメータは、対象林地で観測された樹冠通過雨量を入力量として得られる計算水位ハイドログラフが観測水位ハイドログラフと一致するように同定される。信頼性の高いパラメータを得るために、複数の洪水イベントの水位ハイドログラフを1組のパラメータ群で再現できるものを探索する。白川谷では1990~1992年に観測された5洪水、橋本林地では2017年と2018年に観測された2洪水を対象にして各流域のモデルパラメータ値を決定した。

(4) 降雨波形の設定

シミュレーションに使用する降雨波形として地球温暖化予測情報第9巻⁷⁾の年最大24時間雨量データの将来予測(2077~95年)値をもとにして作成した確率雨量(表-2)と降雨波形(図-3)を作成した。具体的には橋本林地が位置する白ケ谷を含むグリッドの予測雨量データを使用し、各年の最大24時間降雨量となる降雨波形を抽出する。それを前方集中型、中央集中型、後方集中型に分類し、68%を占めた中央集中型について各時間の平均雨量を求めて代表降雨波形を作成した。

4. 解析結果と考察

(1) 遮断蒸発率, 地表面粗度, モデルの再現性

観測データから推定した白川谷と橋本林地の代表遮断蒸発率は14%と25%であった。これは両林地の間伐率(白川谷30%, 橋本林地15%~20%)から妥当な比率と判断する。ただし、両林とも降雨イベントによって遮断蒸発率は8%~30%とばらつきが見られた。

流出解析から推定された地表面粗度 N は、白川谷が1.2, 橋本林地が1.8であり、橋本林地の粗度は白川谷のおよそ1.5倍と推定された。

図-4に白川谷と橋本林地の洪水水位ハイドログラフ再現結果の一例として両流域で最も洪水ピーク流量が大きかったものを示す。イベント総雨量, 最大24時間雨量, 最大時間雨量は白川谷が427mm, 408mm/24hr, 60.5mm/hr, 橋本林地が897mm, 269mm/24hr, 44.2mm/hrである。橋本林地の再現結果は平成30年西日本豪雨の

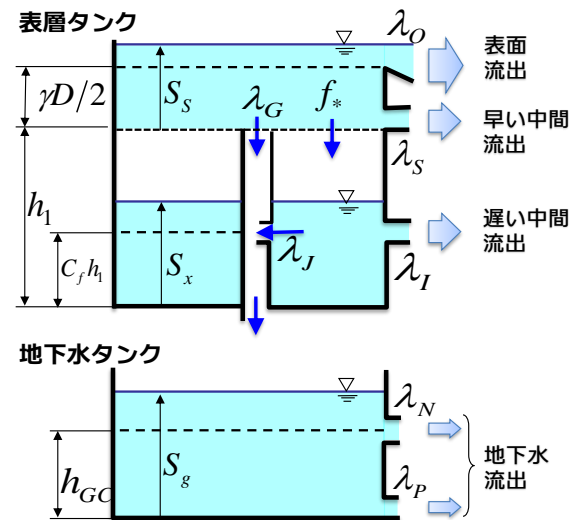


図-2 地表面流分離直列二段タンクモデル

表-2 将来予測確率24時間雨量(徳島県白ケ谷)

確率年	2	5	10	20	50
雨量(mm)	310	490	590	690	790
確率年	100	200	500	1000	
雨量(mm)	870	940	1020	1080	

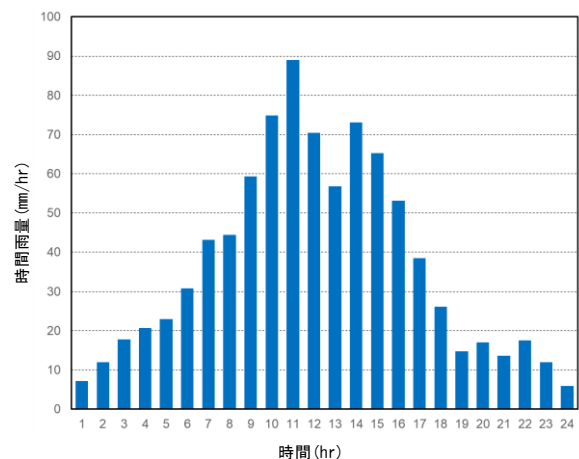


図-3 降雨波形(100年確率雨量)

ものであるが、7月7日以降は流出土砂のためと考えられる観測値異常が認められたので割愛している。洪水流量ピーク時における水位誤差は共に5%未満、解析期間全体の誤差も8%程度と良好であった。

パラメータ同定で使用した降雨イベントの観測雨量はシミュレーションで使用する確率雨量と比べると小さいという点を留意する必要があるが、以上の遮断蒸発率と地表面粗度、およびハイドログラフの再現性を担保にして、両林地の洪水低減機能および、スギ人工林の林相改善による洪水低減機能の向上について議論する。

(2) 現状における白川谷と橋本林地の洪水低減機能の比較(Case 1)

現状の両林地の洪水低減機能を比較する。図-5に作

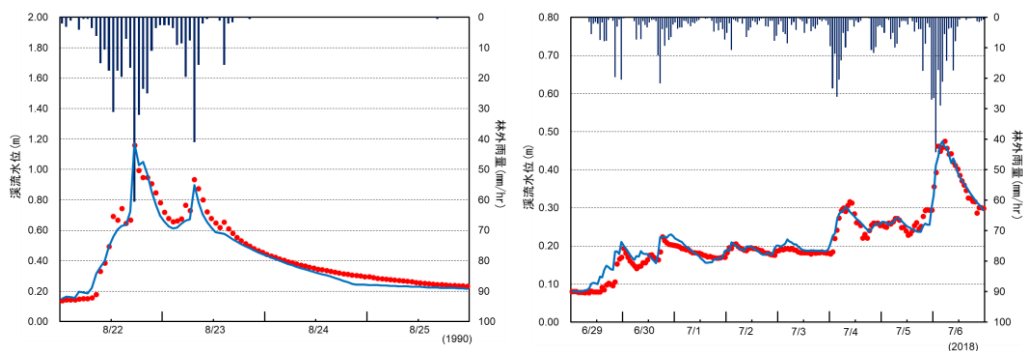


図-4 既往洪水の水位ハイドログラフの再現性 (左：白川谷，右：橋本林地)

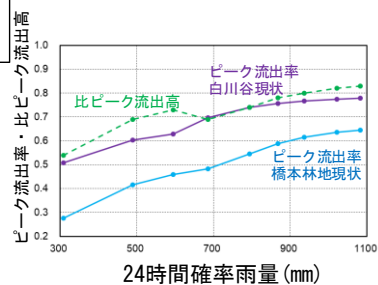
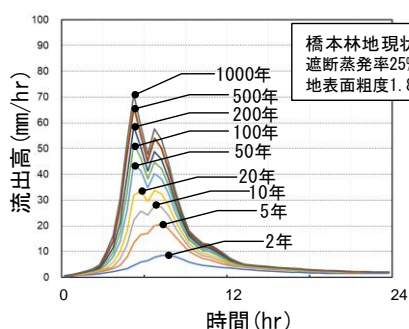
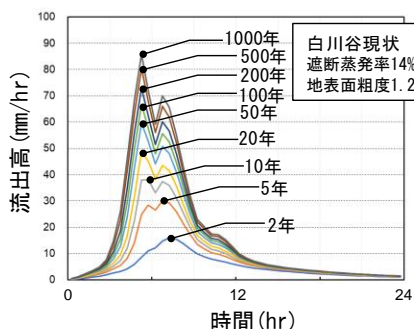


図-5 確率雨量に対する洪水ハイドログラフ (Case1)
(左：白川谷現状，右：橋本林地現状)

図-6 確率雨量に対するピーク流出率
と比ピーク流出高 (Case1)

成した降雨波形を用いた流出シミュレーションの結果を示す。図中のシンボル (●) はピーク発現時間を示す。また図-6には確率年雨量に対するピーク流出率 (最大降雨強度に対するピーク流出高の割合) と比ピーク流出高 (白川谷のピーク流出高に対する橋本林地のピーク流出高) を示す。図-5からピーク発現時間を読み取ると、白川谷では10年確率雨量以下でしかピーク遅れ (1つ目の降雨ピーク時より遅れてハイドログラフの最大値が現れる) は認められないが、橋本林地では20年確率雨量でもピークの遅れが認められる。図-6からピーク流出率を見ると白川谷に対して橋本林地は明らかに小さく、例えば2年確率雨量では白川谷0.51に対して、橋本林地は0.28であった。ただし雨量が大きくなると徐々に差は小さくなり、200年確率雨量以上ではほぼ一定となる。

(3) 土壌の保水能の影響評価 (Case 2)

森林の洪水低減機能は遮断蒸発や地表面粗度の他に土壌の保水能の影響を受ける。そこで対象としたスギ人工林と針広混交複層林の土壌の保水能の差異を評価するために、両林地の遮断蒸発率を0%、地表面粗度を白川谷の1.2で統一した場合のシミュレーション結果を前節に倣って図-7、図-8に示す。ピーク流出率は2年確率雨量で白川谷0.64、橋本林地0.50と差が生じたものの、50年確率以上の降雨では両者の流出率は約0.9とほぼ同じで差がなくなる。これは洪水防御計画の対象となるような雨量規模では、土壌の保水能は洪水ピーク流量の低減に

ほとんど寄与しないこと、土壌層の改善による洪水ピーク流量の低減は難しいことを示唆するものだと考える。

(4) 白川谷の地表面粗度を増強した場合 (Case 3)

現状の白川谷は一般的なスギ林であるが、これを橋本林地のように針広混交林化して、林床植生量や落葉落枝量を増加させることによって地表面粗度を増強した場合を考える。白川谷モデルの地表面粗度 N を1.2から橋本林地の1.8にした場合のシミュレーション結果を前節に倣って図-9と図-10に示す。その結果、ピーク流量の低減効果は2年確率雨量から1000年確率雨量まで平均5%程度が見込まれた。ピーク流量発現時間は10年確率雨量で1時間の遅れが認められた。

(5) 白川谷の遮断蒸発率を増強した場合 (Case 4)

現状の白川谷を橋本林地のように複層林化し、低間伐施業とした場合を考える。白川谷モデルの遮断蒸発率を14%から25%に増強させた場合のシミュレーション結果を図-11と図-12に示す。ピーク流量の低減効果は平均16%程度が見込まれ、その効果は地表面粗度より大きい。またピーク流量発現時間も10年確率雨量以下で1時間以上の遅れが認められた。

(6) 白川谷の地表面粗度と遮断蒸発率を共に増強した場合 (Case 5)

現状の白川谷の橋本林地のように針広混交複層林化し、

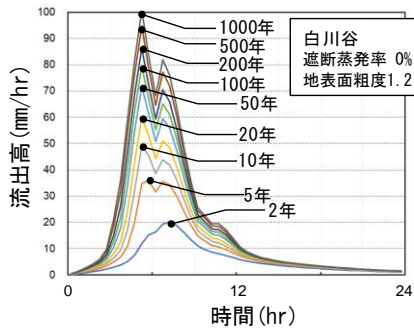


図-7 Case2 確率雨量に対する洪水ハイドログラフ
2 林地の主に土壌の保水能の洪水低減効果の比較

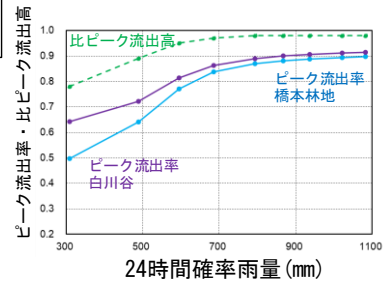
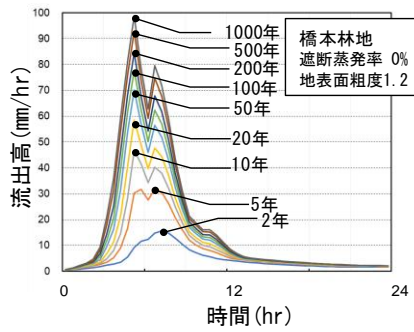


図-8 Case2 ピーク流出率と
比ピーク流出高

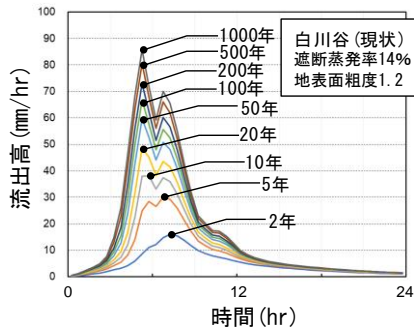


図-9 Case3 確率雨量に対する洪水ハイドログラフ
白川谷の地表面粗度を増強した場合の洪水低減効果

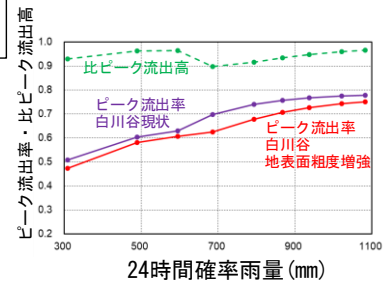
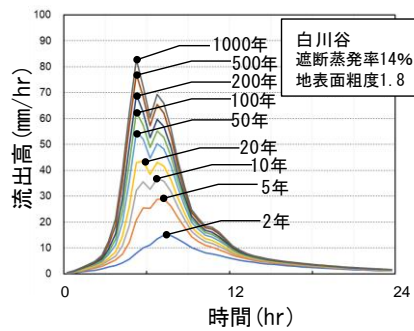


図-10 Case3 ピーク流出率と
比ピーク流出高

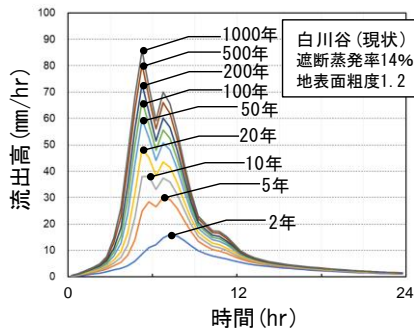


図-11 Case4 確率雨量に対する洪水ハイドログラフ
白川谷の遮断蒸発率を増強した場合の洪水低減効果

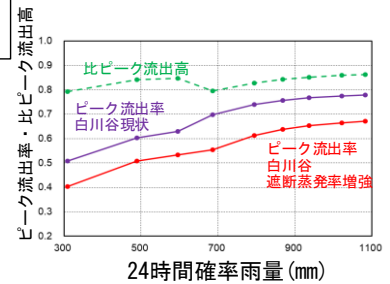
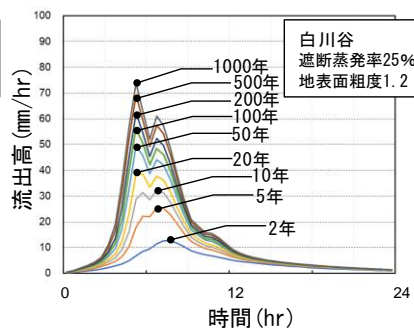


図-12 Case4 ピーク流出率と
比ピーク流出高

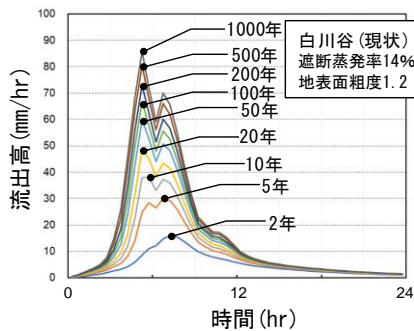


図-13 Case5 確率雨量に対する洪水ハイドログラフ
白川谷の地表面粗度と遮断蒸発率を増強した場合の洪水低減効果

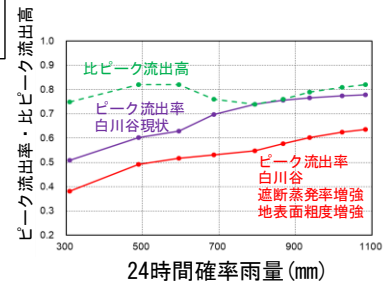
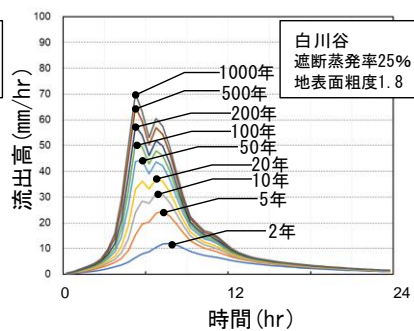


図-14 Case5 ピーク流出率と
比ピーク流出高

弱間伐施業を採用して、地表面粗度と遮断蒸発率の両方を橋本林地のそれと同等にした場合のシミュレーション結果を図-13、図-14に示す。洪水ピーク流量の低減効果

は2年確率雨量から1000年確率雨量まで平均して20%程度、50年確率雨量では25%程度の低減が見込まれた。ピーク流量発現遅れも20年確率雨量以下で認められた。

5. 結論

流域治水を念頭に、河川整備計画の目標年限で実現可能な森林の洪水低減機能の向上策として、森林施業によって比較的容易で短期間に変更可能な遮断蒸発率と地表面粗度の増強に注目した。そして将来予測降雨波形を用いた流出シミュレーションから洪水ピーク流量の低減と発現時間遅れを考察し、以下の知見を得た。

- 1) 針広混交複層林や林床植生の育成・保全に努めたスギ林経営がされている橋本林地の洪水ピーク流量の低減効果は一般的なスギ人工林と見なされる白川谷より 20%程度高いと見積もられた。また洪水ピーク流量の発現遅れも確認された。
- 2) 2つの林地の地表面粗度と遮断蒸発率を同一にしたシミュレーション結果から、50年確率雨量以上の大雨における両林地の洪水ピーク流出率は 0.9 でほぼ等しくなると推察され、計画規模以上の洪水において、これら以外の森林特性（例えば土壌層厚）は洪水ピーク流量の低減にはほとんど寄与しないと考えられた。
- 3) 林相転換と施業法の変更によって白川谷の遮断蒸発率と地表面粗度を橋本林地のそれらと同程度に改善した場合、現状より約 20%程度の洪水ピーク流量の低減が見込まれ、その 8割は遮断蒸発率、2割は地表面粗度の効果であることが示唆された。

洪水低減における遮断蒸発の役割は大きいですが、降雨イベントによって大きなばらつきが見られるため、過大な期待は危険である。また遮断蒸発率や地表面粗度と林地構造の定量的関係について研究を進める必要がある。

謝辞：林地踏査や水文観測装置の設置に多大な便宜を図ってくださった橋本光治氏、延子氏、忠久氏に感謝の意を表します。本研究は、文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラムテーマC気候変動リスク情報の基盤技

術開発」において、気象研究所が作成した温暖化による将来気候変動予測データを用いて行った。将来降雨の作成と森林の洪水流量影響評価は環境省平成 29～31年度地域適応コンソーシアム中国四国地域事業委託業務により実施された。また科学研究費補助金（基盤研究 C, 19K04621）を受けた。

参考文献

- 1) 日本学術会議，地球環境・人間生活に関わる農業及び森林の多面的な機能の評価について（答申），2001.
- 2) Ronald Amundson, Asmeret Asefaw Berhe, Jan W. Hopmans, Carolyn Olson, A. Ester Sztein and Donald L. Sparks : Soil and human security in the 21st century, *Science*, 348, DOI:10.1126/science.1261071, 2015.
- 3) 小川健一郎，田村隆雄，瀧川紀子，桑原正人，高西春二：樹種転換を伴う銅山川上流域における 50年間の洪水流出特性の変化，*水工学論文集*，55，pp.571-576, 2011.
- 4) Calder, I.R and Wright, I.R : Gamma-ray attenuation studies of interception from Sitka spruce-som evidence for an additional transport mechanism, *Water Resour. Res.*, 22, pp.409-417, 1986.
- 5) 塚本良則，丹下勲，峰村徹哉：森林の樹冠遮断量について，*波丘地研究*，6，pp.60-82, 1988.
- 6) 五味高志，宮田秀介，恩田裕一：ヒノキ人工林流域における表面流の発生と降雨流出特性，*水利科学*，No.311，pp.77-94, 2010.
- 7) 気象庁：地球温暖化予測情報 第9巻，<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/index.html>，確認日 2020年6月30日。
- 8) 小松光：ヒノキ林における間伐区と無間伐区の遮断蒸発量の比較，pp.1-12，九州大学演習林報告，No.89，2008.
- 9) 杉田倫明，田中正：*水文科学*，pp.104-111，共立出版，2009.
- 10) 田村隆雄，端野道夫，橋大樹：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同定法，*水工学論文集*，50，pp.355-360, 2006.

(Received June 30, 2020)
(Accepted August 28, 2020)

IMPROVEMENT OF FLOOD REDUCTION FUNCTION OF FORESTED BASIN BY REINFORCEMENT OF EVAPORATION RATE AND GROUND ROUGHNESS

Takao TAMURA, Shotaro UEDA, Yasunori MUTO and Mahito KAMADA

Two forest operation techniques with a flood peak reduction effect were discussed using a tank-model and two small artificial forested basins where forest physiognomy was different. One operation was the way to strengthen the insulation evaporative rate by changing its physiognomy, other was the way to make forest floor vegetation and ground roughness increased. The effect when artificial cedar forest was replaced with a mixed conifer-hardwood forest was discussed. As a result, it was estimated that the flood peak flow decreased around 20% before the replacement.