

人工林の針広混交林化による 森林の洪水低減機能向上に関する研究

上田 尚太朗¹・田村 隆雄²・武藤 裕則³・鎌田 磨人⁴

¹学生会員 徳島大学大学院創生科学研究科 (〒770-0856 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: c612031007@tokushima-u.ac.jp

²正会員 博士(工学) 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (〒770-0856 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

E-mail: tamura@ce.tokushima-u.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 Ph.D 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 (〒770-0856 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 (〒770-0856 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

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

大流域における人工林の針広混交林化により期待される遮断蒸発率と地表面粗度の増強が森林の洪水低減機能にどれほど影響を与えるかを検討した。針広混交林を形成する一級河川那賀川流域の橋本林業地において水文観測を行うことで得られた遮断蒸発率と地表面粗度を長安ロダム流域に適用し、洪水シミュレーションを行った。ピーク流量やその発生時間等で洪水低減機能の向上具合を評価した。その結果、現地の将来予測100年確率雨量に対する洪水ピーク流量は、地表面粗度の増強により6.1%、遮断蒸発の増強によって3.6%の減少が推定された。

Key Words: forested basin, flood reduction function, interception evaporation, ground roughness, runoff analysis

1. はじめに

近年、日本では流域治水が注目されており、その中でも森林整備による洪水流量の低減が検討されている。この森林の洪水低減機能は洪水ピーク流量の減少やピーク流量の発生時間の遅延という形で期待されている。国土交通省の流域治水プロジェクト¹⁾において116流域のプロジェクト中87%にあたる101流域において森林整備による対策が計画されており、例えば兵庫県の揖保川流域では森林の針広混交林化による洪水対策が実施されている。植生の転換による災害軽減に関しては、川越ら²⁾によって斜面災害軽減と森林産業の両立が可能なEco-DRRマップが開発されている。マップの開発は良質なキリ材の適地と斜面崩壊リスクを照査することで行われており、Eco-DRRに向けた植生転換の検討がされている。また、太田ら³⁾によってダム流域規模での植生の違いによる流出の検討がされており、広葉樹から針葉樹の転換でモデルパラメータや流出特性が変化することが示されている。

森林の洪水低減機能の要素として、樹冠における遮断蒸発作用、下層植生等が関与する地表面粗度による地表面流の流下速度の減少が挙げられる。また両要素ともに針広混交林化により改善が容易であると考えられる。これを受けて田村ら⁴⁾の研究では小流域を対象に針広混交林化による地表面粗度と遮断蒸発の増強が洪水ピーク流量の低減やピーク流量の発生時間の遅れに繋がることを示した。しかし、洪水防御計画の対象となるような大流域における植生の転換による洪水流量低減に関する検討まで至っていない。

そこで本研究ではスギ・ヒノキ林の中に積極的に広葉樹を残すことで針広混交林とした徳島県の橋本林業地を参考に、それに隣接する長安ロダム流域を針広混交林化した場合の洪水ピーク流量低減率やその発生時間の遅れについて考察した。なお、今後起こりうる地球温暖化による大雨を考慮し、地球温暖化予測情報第9巻⁵⁾を基に作成した将来予測雨量を用いて流出シミュレーションを行う。

2. 対象流域及び林地

本研究で対象とする橋本林地（以下、橋本林地）の位置と長安ロダム流域の流域図を図-1、長安ロダム流域を小流域ごとに分割し、流域内の森林のうち人工林の割合を示したものを図-2に示す。

橋本林地は徳島県那賀郡那賀町白ケ谷に位置する個人が所有・管理する林地である。林地の面積は 1.1km²、標高は 350～660m であり、橋本林地から南東約 2km に位置する国土交通省の桜谷雨量観測所によると年間降水量は約 3400mm である⁶⁾。地質は秩父累帯に属し、砂岩と泥岩を主としている。林相はスギとヒノキを主としており、15～20%の弱度間伐（通常 30%）を行っている。また、コジイ、ケヤキといった広葉樹を積極的に残しており、これにより林内の樹種は豊富で 300 種類以上もの植種が分布している。これより林地は針広混交林で、下層植生も豊富である。

長安ロダム流域は一級河川那賀川の上流部に位置しており、流域面積が 494km² に対し森林面積は 440 km² であり約 90%を占めていることから、山地森林流域である。また、森林のうち 300km² (68%) はスギやヒノキを中心とする人工林、残りは天然林が分布している。図-2より、小流域ごとに差があるものの、人工林が広く分布していることがわかる。特に流域南部の那賀川本川沿いでは人工林が多い。流域の年間降水量は 2500～3000mm であり⁷⁾、地質は秩父累帯と四万十帯に属し、砂質泥岩と砂岩を主としている。

図-1 より長安ロダム流域と橋本林地は隣接しており、地質や降水量といった特徴も類似していることから、橋本林地のような針広混交林を長安ロダム流域の人工林で再現するシミュレーションは妥当であると判断した。

3. 研究手法

(1) 橋本林地及び長安ロダム流域の遮断蒸発率の決定

橋本林地では林外雨の測定として 0.2mm 転倒ます型雨量計を 1 カ所、樹冠通過雨の測定として水平斜影面積 1.0m² の集水板を取り付けた 500cc 転倒ます型雨量計を 3 カ所設置し、2017年7月から2021年1月まで観測を行った。この期間内に降った一降雨あたり 100mm 以上の降雨イベントを抽出し、遮断蒸発率を求めた。なお、本研究における一降雨の定義は“6時間以上の無降水状態が続かない場合”としており⁸⁾、0.1mm/hr 以下の雨量は 0mm として扱う。抽出されたイベント数は 29 であり、最大一降雨量は降雨継続時間が 41 時間、総雨量 434.0mm であった。遮断蒸発率は抽出した降雨イベントにおける林外雨量、樹冠通過雨量の観測データから以下の式より求めた。



図-1 対象流域

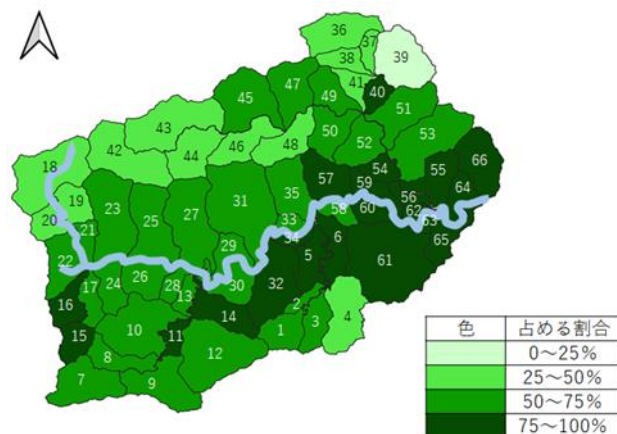


図-2 人工林の割合

表-1 橋本林地における遮断蒸発率

平均値	上限値	下限値
20.2%	43.1%	4.0%

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

ここで I_{ave} : 一降雨あたりの平均遮断蒸発率, r : 林外雨量(mm/hr), r_t : 樹冠通過雨量(mm/hr), i : 時間, n : 雨量観測時間数(個), A_f : 樹冠の投影面積, A_{ttl} : 流域面積である。なお、求めた遮断蒸発率の外れ値を考慮し、四分位範囲の 1.5 倍を上下限とし範囲外のデータは除外した。3 カ所の遮断蒸発率のデータを平均することで、橋本林地の遮断蒸発率を決定した。また、遮断蒸発率は風向や降雨強度、降雨継続時間といった気象条件により大きく変動する。よって平均値に加え上限値と下限値も流出計算に採用した。表-1 に橋本林地における遮断蒸発率を示す。なお、遮断蒸発率を求める際に樹幹流下量は加味していない。これは林外雨に対する樹幹流の割合が 10% 以下と見積もられ^{9) 10)}、影響が小さいと判断したためである。

長安ロダム流域では樹冠通過雨量を測定しておらず、観測による遮断蒸発率の導出はできない。そこで、単位面積当たりの材積量の増加に伴い、樹木の葉量が増加し、遮断蒸発率が高くなると考え、本研究では流域の単位面積当たりの材積量と遮断蒸発率は比例すると仮定した。橋本林地における平均遮断蒸発率 (20.2%) と単位面積

当たりの材積量を (50,243m³/km²) 基準とし、比例関係から小流域ごとの遮断蒸発率を求めた。また、長安ロダム流域の人工林を針広混交林化した時を想定し、施業可能な人工林の割合に応じて遮断蒸発率の改変を行う。式(2)に改変後の遮断蒸発率の計算式を示す。

$$I' = \begin{cases} (I_h - I) \cdot F + I & (I_h > I) \\ I & (I_h < I) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 I' ：改変後の遮断蒸発率、 I_h ：橋本林地の遮断蒸発率、 I ：改変前の遮断蒸発率、 F ：人工林の割合である。なお、橋本林地より材積量が多い小流域に関しては、遮断蒸発率が現状より下がらないよう針広混交林化を図る。これにより求めた遮断蒸発率と単位面積当たりの材積量の関係を図-3に示す。

(2) 橋本林地及び長安ロダム流域の地表面粗度の決定

流出計算は図-4に示す地表面流分離直列二段タンクモデル¹¹⁾を基礎とした分布型流出モデルを使用する。また、66の小流域のうち地形や地質、勾配をもとに図-5のように4つにグループ分けをし、それぞれにパラメータを与えている。このタンクモデルの特徴は土壌の飽和により発生する地表面流と地中からの流出を分離できる点である。飽和地表面流はkinematic wave理論に従うと仮定している。地表面流出量 q_o は次のように定義されている。

$$q_o = \lambda_o S_o^m \quad (3)$$

ここで λ_o ：斜面粗度に関する係数(1/hr)、 $m=3$ (層流則として)、 S_o ：表面流発生領域の平均表層貯留高(mm)である。この λ_o は層流則とManning則を関係づけた次式で表される。

$$\lambda_o = 2.52 \times 10^{-3} \cdot \frac{I_s^{0.9}}{r_{max}^{0.8} (N \cdot L_s)^{1.8}} \quad (4)$$

ここで、 r_{max} ：地表面流最大流出強度(mm/hr)、 N ：地表面粗度(m^{1/3}·s)、 I_s ：斜面勾配、 L_s ：斜面長(km)である。この N が地表面流の障害を示す代表値として考え、次節に述べるパラメータ同定手法により取得する。なお、地表面粗度 N においても式(2)と同様に次のように針広混交林化によるパラメータ値の変更を行っている。

$$N' = (N_h - N) \cdot F + N \quad (5)$$

ここで N' ：改変後の地表面粗度、 N_h ：橋本林地の地表面粗度、 N ：改変前の地表面粗度、 F ：小流域の人工林の割合である。表-2に改変前後の地表面粗度を示す。

(3) パラメータ同定手法

地表面流分離直列二段タンクモデルは地表面粗度 N を含む12個のパラメータを用いて流域の流出機構を再現している。パラメータは、樹冠通過雨量を入力値として、得られる推定ハイドログラフを観測ハイドログラフと一致するよう調整することで同定ができる。橋本林地にお

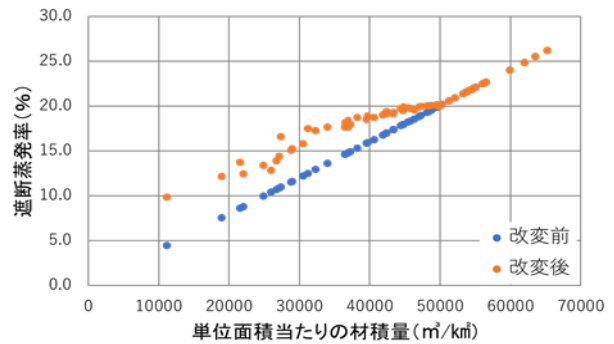


図-3 遮断蒸発率と単位面積当たりの材積量の関係

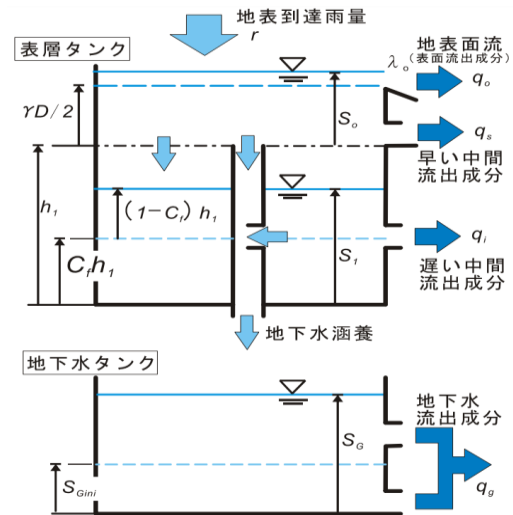


図-4 地表面流分離直列二段タンクモデル

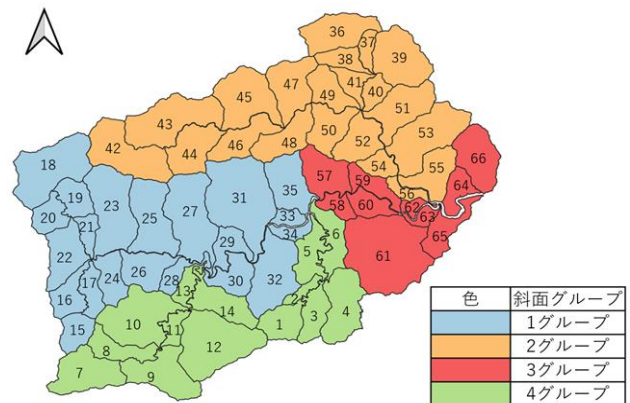


図-5 長安ロダム流域のグループ分け

表-2 改変前後の地表面粗度

グループ	1	2	3	4
改変前	0.62	1.17	0.92	1.12
改変後	1.54	1.77	1.78	1.73

けるパラメータ同定は2017年と2018年の2洪水イベント、長安ロダム流域は2003年の2洪水イベントで行った。なお、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、橋本林地は観測水位ハイドログラフ、長安ロダム流域は観測流量ハイドログラフで同定を行った。

(4) 流出計算に用いるハイドログラフの決定

地球温暖化予測情報第9巻の将来予測降雨(2077~95

表-3 将来予測確率24時間雨量

確率年	2	10	100
雨量(mm)	310	590	870

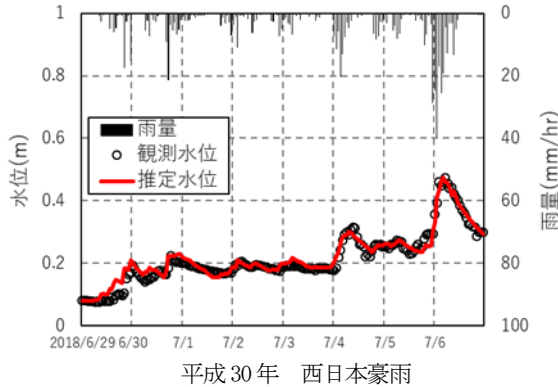


図-7 パラメータ同定に使用したハイドログラフの再現結果 (左：橋本林地，右：長安ロダム地点)

年) から年最大24時間雨量を抽出し、将来予測確率24時間雨量を求めた。これをもとに平成15年台風10号のハイドログラフを2, 10, 100年確率に引き伸ばすことで流出計算に用いる。なお、この台風はアメダス福原旭観測所にて最大24時間雨量481mm、日雨量も歴代6位を記録している(2021年1月時点)。以上より、降雨規模による遮断蒸発と地表面粗度の洪水低減への効果の違いを見ることとした。表-3に将来予測確率24時間雨量、図-6に100年確率に引き伸ばしたハイドログラフを示す。

4. 解析結果と洪水低減機能の考察

(1) 各流域の再現結果

同定パラメータによる流域の洪水ハイドログラフ再現結果を図-7に示す。解析期間全体の誤差は橋本林地は約8%、長安ロダム流域では約9%であった。また、洪水ピーク時における誤差は両イベントで5%未満であった。したがって妥当なパラメータを得られたと判断する。

(2) 遮断蒸発率及び地表面粗度を改変した場合の比較

遮断蒸発や地表面粗度の改変がピーク流量の減少に与える影響を調べる。そこで、橋本林地を参考に長安ロダム流域全体の人工林を針広混交林化した場合を想定し、流出計算を行うことでピーク流量減少率等にて洪水低減機能の評価した。なお、ピーク流量減少率は現況に対する改変後のピーク流量の減少率である。図-8は流域において現況及び遮断蒸発率と地表面粗度を改変した場合で流出計算した洪水ハイドログラフである。なお使用した遮断蒸発率は平均値である。図-9の(a), (b),

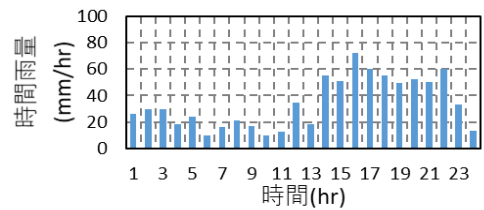


図-6 確率雨量ハイドログラフ (100年確率)

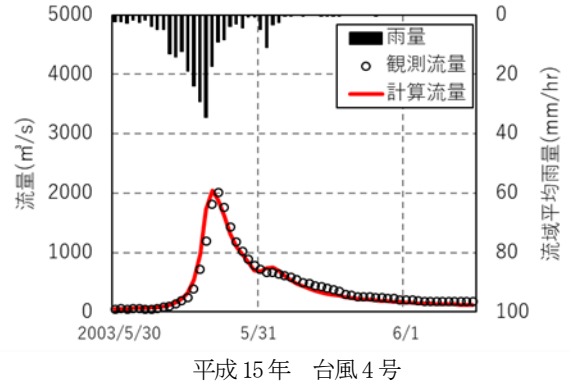


図-8 長安ロダム地点における洪水ハイドログラフ (遮断蒸発率：平均)

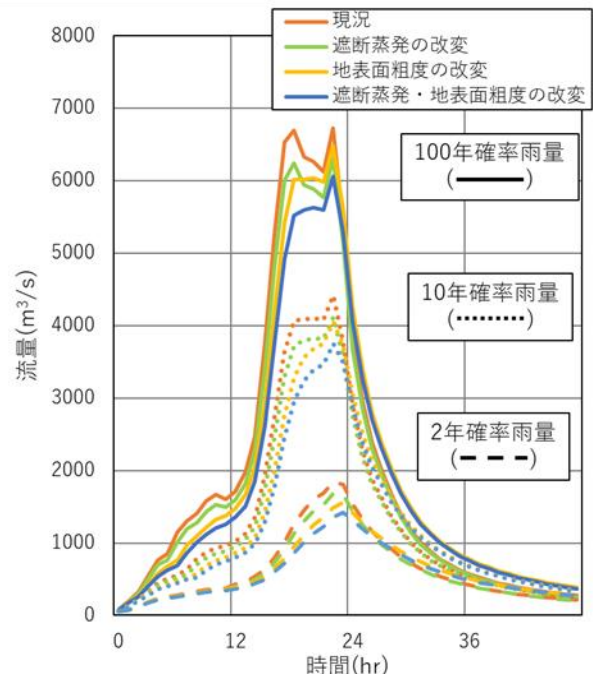


図-9 長安ロダム地点における洪水ハイドログラフ (遮断蒸発率：平均)

(c)に改変するパラメータごとのピーク流量減少率を確率年ごとに示す。

a) 洪水ハイドログラフ

図-8の各確率年雨量において、現況より針広混交林化後のピーク流量はいずれも減少しており、遮断蒸発率と地表面粗度の洪水低減機能への寄与が確認できた。現況のハイドログラフを見ると2年確率は一峰型であるのに対し100年確率では二峰型となっておりピーク流量が早期に発現している。一方で100年確率の地表面粗度を考慮した場合のハイドログラフ(黄色、青色)は一峰型である。これは地表面粗度の改変によって表面流の流下速度が遅れたことが起因している。以上より地表面粗度

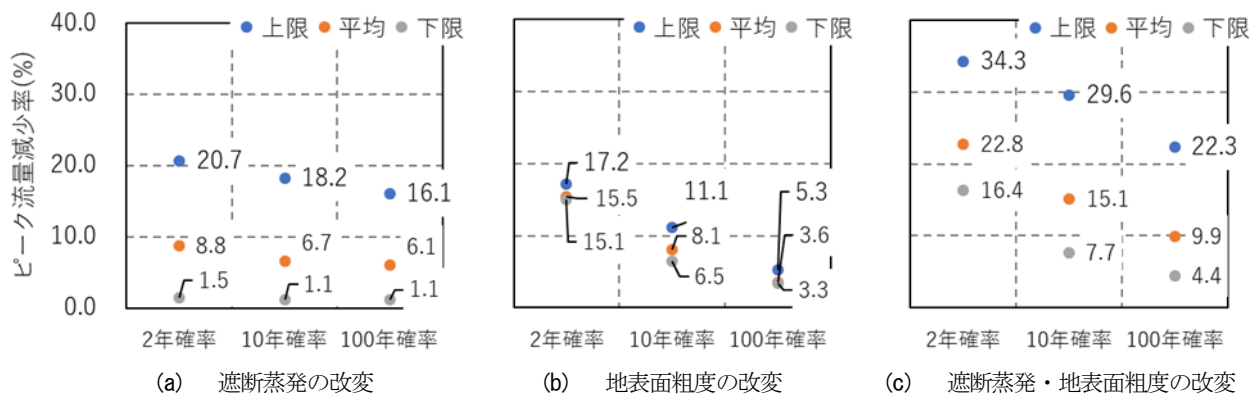


図-9 100年確率雨量におけるピーク流量減少率

パラメータが流出の減少・遅延に効果を発揮していることが読み取れる。ただし地表面粗度の改変（黄色）を見るとピーク流量は現況と比べわずか3.6%減であった。

b) ピーク流量減少率

図-9 (a) の遮断蒸発の改変によるピーク流量減少率を確率年ごとに比較すると、(b) の地表面粗度の改変と比べ上下限の幅が大きいという特徴がある。具体的には確率年に問わず遮断蒸発率が上限と下限の場合で減少率に15%以上の差が生じた。また遮断蒸発率の大小に関わらず確率雨量の増加とともに洪水低減の効果は減少している。しかし遮断蒸発率が平均の場合、100年確率雨量に対して減少率は6.1%あり、地表面粗度の改変と比べ高い洪水流量低減効果が発揮され则认为される。

図-9 (b) の地表面粗度を变化させた場合の各確率年の共通点として上下限の幅が小さいことが挙げられる。これは地表面粗度は気象条件の影響を受けにくいことを示している。しかし、遮断蒸発の改変と比べると降雨規模が大きくなるとピーク流量減少率は大幅に低下する。

図-9 (c) の遮断蒸発・地表面粗度の改変について考察する。図-9 の (a) , (b) , (c) を見ると遮断蒸発率が下限の場合、前者2つの和は遮断蒸発・地表面粗度の改変に相当している。ただし、遮断蒸発率が高くなるとともにピーク流量減少率における遮断蒸発の寄与が高くなる。また、遮断蒸発率の上下限の幅は (a) の場合と類似しており気象条件によってピーク流量減少率に差があるものの、平均の場合10~23%のピーク流量が低減していることから比較的高い洪水低減効果が期待できる。

c) 地表面流貯留高

長安口ダム流域内の小流域 (No.15) における遮断蒸発率が平均値の時の地表面流貯留高の経時変化を図-10 に示す。これを見ると2年確率雨量において、地表面粗度はピーク流量あたりで流出を抑制していることが推察される。それに対し、100年確率雨量において地表面粗度の改変を現況と比較すると、ピーク貯留高は約0.6mmしか減少しておらず、ピーク流量の減少にはあまり寄与していない。しかし、流出の遅延という観点では先行降

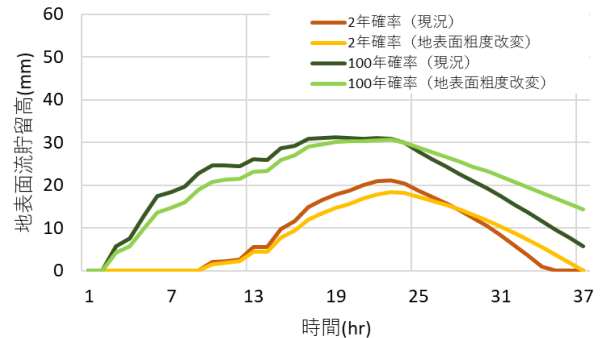


図-10 小流域 (No.15) における地表面流貯留高 (遮断蒸発：平均のみ)

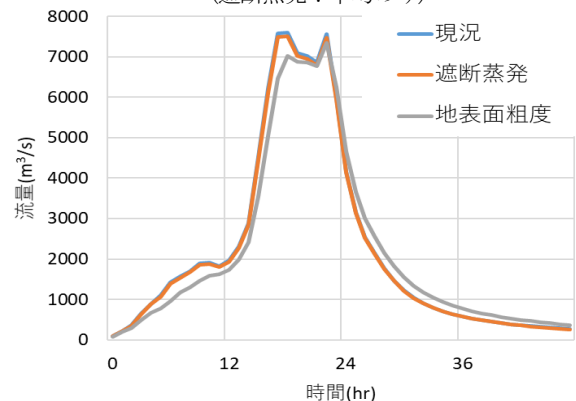


図-11 100年確率雨量におけるハイドログラフ (遮断蒸発率：下限のみ)

雨の流出を抑制しピーク後に流出させていることが読み取れる。図-11 に100年確率雨量において遮断蒸発率が下限の場合のハイドログラフを示す。ピーク発生時間を比較すると現況や、遮断蒸発の改変は降雨開始後19時間、地表面粗度の改変は23時間で発生しており、ピーク流量の発現を4時間遅延させている。遮断蒸発が発揮できない気象条件下でも、地表面粗度の改変は洪水の遅延効果を発揮することが推察される。図-10, 11 より地表面粗度の表面流出の阻害、即ち洪水ピーク流量の遅延効果が確認できた。

5. 結論

本論文では針広混交林化によって高い遮断蒸発率と地表面粗度が期待できる橋本林地を参考に長安口ダム流域

で同様の森林管理を適用し、どれほどの洪水低減機能が発揮されるかを考察した。具体的には将来予測降雨確率雨量を用いて、遮断蒸発と地表面粗度がどれほど流域治水に寄与するかをピーク流量、ピーク流量発生時間等で評価した。以下に結果と知見をまとめる。

- 1) 遮断蒸発率と地表面粗度を同時に改変した場合、100年確率雨量(870mm/24hr)に対してピーク流量減少率は約10%であった。
- 2) 遮断蒸発のみを改変した場合、100年確率に対し、ピーク流量減少率は6.1%であった。また遮断蒸発率の上下限におけるピーク流量減少率の差が15%以上あり、気象条件によってピーク減少率に差が生じた。
- 3) 地表面粗度のみを改変した場合、ピーク流量減少率は100年確率雨量に対して3.6%程度であった。しかし地表面粗度の改変はピーク発生時刻を遅らせるケースもあり、洪水低減機能に大きな影響を及ぼす要素の1つといえる。

遮断蒸発は洪水低減に寄与する結果が得られた。しかし、本研究では遮断蒸発率と材積量の比例関係や、蒸発率が一定であることを前提としている。よって材積量と遮断蒸発の相互関係や積算雨量に応じた遮断蒸発率を考慮し研究を進める必要がある。

謝辞: 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。また、森林のデータについては徳島県農林水

産部と林野庁からご提供いただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省: 流域治水プロジェクト
https://www.mlit.go.jp/river/kasen/ryuiki_pro/index.html, 確認日 2021年6月30日
- 2) 川越清樹, 林誠二, 風間聡: 森林資源の活用を考慮した斜面に対するEco-DDRマップの開発, 土木学会論文集G(環境), 第76巻5号, 2020.
- 3) 太田岳史, 高橋智己, 竹内美次: ダム流域における森林状態が流出特性に与える影響の流出モデルによる評価, 水文・水資源学会誌, 第3巻1号, pp.17-25, 1990.
- 4) 田村隆雄, 上田尚太郎, 武藤裕則, 鎌田磨人: 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, 土木学会論文 B1(水工学), 第76巻2号, 2020.
- 5) 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 2021年6月30日
- 6) 国土交通省, 水文水質データベース, 桜谷雨量観測所
<http://www1.river.go.jp/cgibin/SiteInfo.exe?ID=108061288803004>, 確認日 2021年6月30日
- 7) 国土交通省四国地方整備局, 徳島: 那賀川水系河川整備計画【変更】, 2019.7
- 8) 菊池渉: 北海道内の豪雨傾向の地域・経年特性について, 北海道開発技術研究発表会, 2009年2月26日.
- 9) 田中延亮, 蔵治光一郎, 白木克繁, 鈴木祐紀, 鈴木雅一, 太田猛彦, 鈴木誠: 袋山沢試験流域のスギ・ヒノキ壮齡林における樹冠通過雨量, 樹幹流量, 樹冠遮断量, 東京大学農学部演習林報告, 113, 2005.
- 10) 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, 九州大学演習林報告, No.89, pp.1-12, 2008.
- 11) 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同定法, 水工学論文集, pp.355-360, 2006.

(Received June 30, 2021)
(Accepted September 3, 2021)

STUDY ON THE IMPROVEMENT OF FLOOD MITIGATION FUNCTIONS OF FOREST BY CHANGING NEEDLELEAF FOREST TO NEEDLELEAF-BROADLEAF MIXED FOREST

Shotaro UEDA, Takao TAMURA, Yasunori MUTO and Mahito KAMADA

In this study, we examined the effects of the enhanced interception evaporation rate and surface roughness expected from changing needleleaf forest to needleleaf-broadleaf on flood mitigation functions. By conducting hydrological observations in the Hashimoto forestry area, which is a mixed forest of needle and broadleaf, the obtained interception evaporation rate and surface roughness were adapted to Nagayasuguchi dam and runoff simulation was conducted. We used a tank model for the spill simulation, which was evaluated in terms of peak flow rate and generation time. As a result, increasing the surface roughness reduced the peak flow rate by 6.1% relative to the 100 year Probabilistic rainfall, and increasing the interception evaporation rate reduced it by 3.6%. Therefore It was confirmed that this is an important function in flood reduction.