

30. 樹冠遮断を考慮したRRIモデルの基礎研究

中村 要介^{1*}・新井 章珣¹・遠藤 咲季¹・阿部 紫織¹

¹三井共同建設コンサルタント株式会社 河川計画事業部 水文・水理解析部

(〒141-0032東京都品川区大崎一丁目11番1号)

* E-mail: y_nakamura@mccnet.co.jp

本研究ではRRIモデルにおける降雨が斜面水深上に直接到達することに着目し、有効降雨の概念を取り込む必要があると考え、樹冠遮断モデルの適用を試みた。樹冠遮断モデルは樹冠タンクと樹幹タンクを接続した2段タンクで表現したSuzuki(1980)の手法をそのまま適用した。まず中央集中型のモデル降雨で挙動を確認した結果、初期損失やピークの低減が確認できた。また、本モデルは蒸発散を考慮することでタンク水深が17.5時間で空となるため、連続的に損失を考慮することができる。実河川での適用性検証では、これまで敏感に反応していた洪水初期での水位波形がわずかながら精度向上した。また、全国55河川・140イベントでも検証した結果、全体の70%で洪水波形の相関係数が向上したことを確認できた。

Key Words : RRI model, canopy interception model, small-and-middle sized rivers, flood prediction

1. はじめに

わが国は3分の2が森林に覆われている豊かな国土を有している。そのため山地に降った雨は蒸発散による損失や、土壌の保水機能によって一時的に貯留されることは広く知られている。森林流域は、裸地流域より遮断蒸発や蒸散によって多くの水が消費されるため、裸地流域よりも総流出量が少なくなる¹⁾。そのため、降雨流出過程を解析する上で、森林による損失雨量を考慮することは重要である。しかしながら、これまで種々の降雨流出モデルが提案されてきたが、概念的な貯留関数法²⁾や陸ら(1989)の分布型流出モデル³⁾は樹冠遮断や流域貯留等をまとめて流域もしくはメッシュからの損失としてみなしている。近年では土壌層の保水機能に着目して降雨流出を表現するモデル^{4,5)}が多く存在するが、これらのモデルは樹冠遮断と土壌の保水機能について詳細に考慮した降雨流出モデルは少ない。一方、樹冠遮断等による損失について詳細に解析できる分布型の物理モデル^{6,7)}もあるが、その分計算コストも大きくなる。

このような背景より、リアルタイム洪水予測の精度向上にあたっては、樹冠遮断による損失雨量を考慮できるモデルであることが求められる。また、実時間予測として10分間(観測水位の時間間隔)で予測結果を出力することが望ましいことから、降雨流出モデルや樹冠遮断モ

デルは物理的に表現でき、かつ高速に計算できることが理想的である。そのため、降雨流出モデルは拡散波近似を採用しつつ高速な演算が可能なRRIモデル⁸⁾を採用する。一方、樹冠遮断モデルはこれまでも多くのモデルが提案されている。Suzuki(1980)は2段タンクを用いて樹冠通過雨量と樹冠流下量を有効降雨としている⁹⁾。児島ら(2012)では樹冠タンクを2段、樹幹タンクを1段で表現し、合計3段タンクで有効雨量を求めている¹⁰⁾。Baïamonte(2021)は1段タンクの単純な線形貯留モデルで表現¹¹⁾している。樹種や林分密度によって樹冠遮断量は異なる¹²⁾が、本研究では簡便な手法であり、モデルパラメータが明確なSuzuki(1980)を適用した。

以上を踏まえ、本論ではRRIモデルと樹冠遮断モデルを結合することで、洪水波形の予測精度向上を図ることを目的とする。

2. 洪水予測モデル

(1) RRIモデル

RRIモデルは、降雨を入力として河道流量から洪水氾濫までを流域スケールで一体的に解析できるモデルであり、国立研究開発法人土木研究所CHARMが開発した水文モデルである。RRIモデルは主として降雨を入力条件

とし、斜面と河道の流出を解析する。このとき、降雨は図-1に示すように、斜面土層内に直接到達するため、樹木による損失を考慮できない。つまり、RRIモデルに入力する降雨は、樹冠遮断等を考慮した有効降雨である必要があるにもかかわらず、筆者らを含め山地域を対象としたこれまでの先行研究では考慮されてこなかった。勿論、表現したい水水量によって必ずしも必要な現象とは限らないが、国土の3分の2が森林に覆われるわが国では、重要な水文現象の一つである。また、蒸発散についてはRRIモデルの標準機能として付与されており、斜面水深 hs から一律差し引くことが可能である。筆者らは、近藤ら（1992）を参考に対象河川近傍の気象官署の観測値から、年平均値を蒸発散量として設定している¹⁴ため、山地域として考慮してきた水文現象は蒸発散のみとなる。

本研究で用いたモデルパラメータは、これまで筆者が多くの中小河川で適用し、概ね洪水再現性を確保できることを確認してきた表-1に示すパラメータセットを設定する。特に本研究では、樹冠遮断モデルの導入による洪水波形への影響評価を目的としているため、RRIモデルのみのパラメータを例えばSCE-UA法等で最適化した場合には、樹冠遮断モデルの結合によって再現性が改悪するといった評価になる。このことを避けるためにも、あえて一般的なパラメータを用いている。そのため洪水ピークや波形等の絶対的な誤差量を議論するのではなく、本論では洪水波形の相関係数について着目して考察する。

(2) 樹冠遮断モデル

樹冠遮断モデルは前述したように種々のモデルが提案されているが、本研究では簡便な手法であり、モデルパラメータが明確な理由からSuzuki(1980)を適用することとした。本手法は、図-2に示すように樹冠タンクと樹幹タンクの2段タンクで構成され、それぞれのタンクから溢れた樹冠通過雨量(Throughfall)と樹冠流量(Stemflow)を合算して有効雨量を求めている。また、蒸発散量をそれぞれのタンクから一様に差し引くことで連続的に解析できる。樹冠遮断のアルゴリズムは以下の手順で行う。

- 【手順①】 降雨発生
 - 【手順②】 Tank-A（樹冠タンク）へ全量貯水
 - 【手順③】 Tank-Aから蒸発散を差し引く。
 - 【手順④】 Tank-Aの貯水位が b_1 以上であれば、オーバーフロー分に流出率 a_1 を乗じた量が樹冠通過雨量(Throughfall)となり、流出率 b_2 を乗じた量がTank-B（樹幹タンク）へ移動する。
 - 【手順⑤】 手順④で算出した移動量をTank-Bへ貯水
 - 【手順⑥】 Tank-Bから蒸発散を差し引く。
 - 【手順⑦】 Tank-Bからオーバーフロー分が樹冠流量(Stemflow)となる。
 - 【手順⑧】 ThroughfallとStemflowの合計値が有効降雨
- ここで、Suzuki(1980)のモデルパラメータは、 $Ke, E = 0.1618$ [mm/hr], $a_1 = 0.81$, $a_2 = 0.11$, $b_1 = 1.44$ [mm], $b_2 = 0.53$

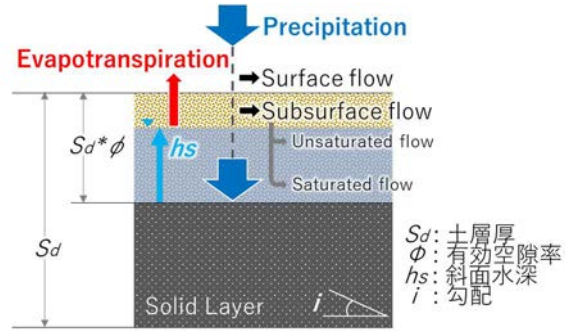


図-1 RRIモデルにおける山地斜面での単一メッシュ構造と雨の扱い方（中間流・表面流一体モデル）

表-1 土地利用別のRRIモデルパラメータとS川の河道形状

土地利用	土地利用						
	水田	畑地	山地	都市	水域		
斜面モデル	共通	等価粗度[m-1/3/s]	0.4	0.4	0.6	0.2	0.2
		土層厚[m]	1.0	1.0	0.5	-	-
		飽和空隙率	0.475	0.463	0.3	-	-
	斜面鉛直	鉛直透水係数[m/s]	1.67d-7	3.67d-6	-	-	-
	Green-Ampt	吸水能	0.3163	0.0889	-	-	-
	斜面側方	飽和水平透水係数[m/s]	-	-	0.01	-	-
	不飽和空隙率	-	-	0.12	-	-	
	透水係数比	4	4	4	-	-	
河道モデル	粗度係数[m-1/3/s]	0.030					
	河川・斜面閾値	50					
	河道幅Cw	3.19					
	河道幅Sw	0.62					
	河道深さCd	1.25					
	河道深さSd	0.32					

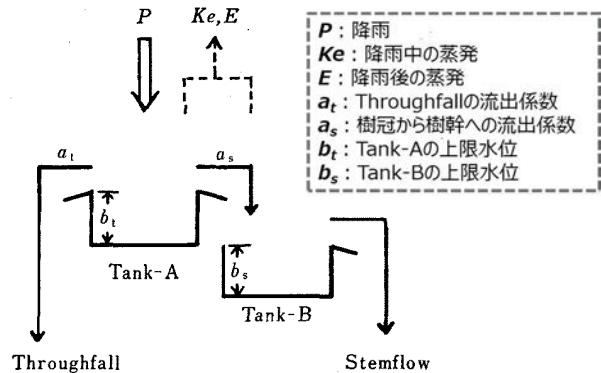


図-2 樹冠遮断モデル（Suzuki, 1980に加筆）

[mm]である。これは滋賀県南東部の桐生流域（風化花崗岩山地）の観測地から同定された値であり、東京での既往測定結果とも良好に対応した値である⁹⁾。そのため、本研究ではモデルパラメータはそのまま利用している。なお、流出率 a_1 と流出率 a_2 の合算値が0.92と1.0以下であり、この8%分の取り扱いに関する詳細な記述がなかったため損失として扱った。最近の研究結果¹³⁾から樹冠や樹幹が飽和しているときには10%弱（9.36%：6事例の平均値）の蒸発散があることを考えると、本研究で8%を損失として扱うことは妥当と考えている。

3. 樹冠遮断モデルの検証

樹冠遮断モデルを構築し、単純なモデル降雨を利用し

てモデル状態量（タンクの水深や有効降雨の値）について挙動を確認した。モデル降雨は、12時間目をピークとする中央集中型（降雨継続時間：24時間）とする。図-3には中央集中型のハイトグラフ、Suzuki(1980)のTank-AとTank-Bの状態量の時間変化、そして降雨量と有効降雨量、さらには蒸発散量を考慮した損失雨量を示した。

まずTank-A（樹冠タンク）の状態量は30分後に満水となり $b_t=1.44$ [mm]で止まっている。その後、Tank-Aからオーバーフロー分に a_s を乗じた分がTank-Bに貯留され、1時間でTank-B（樹幹タンク）も満水となり、 $b_s=0.53$ [mm]で止まっていることがわかる。その後、降雨期間中は満水を保ち、無降雨期間になるとそれぞれ蒸発量に伴い減水していく。Tank-A（樹冠タンク）は降雨終了後17.5時間で空となり、Tank-B（樹幹タンク）は降雨終了後6.5時間で空となった。損失雨量は降雨初期にそれぞれのタンクが空のため多いが、その後は一旦損失が減り、降雨強度とともに8%の損失が上乘せされていく。最大損失量は2.8 mm（ピーク雨量34 mm時）であり、イベント全体では約9.4%の損失となった。本結果と観測値を比較することはできないが、概ね現実的な挙動を示していると考えている。

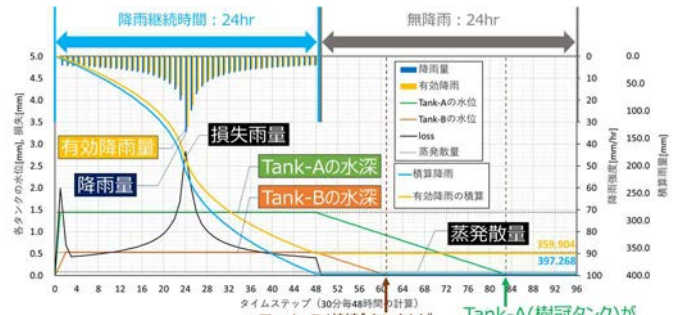


図-3 モデル降雨による状態量の時間変化

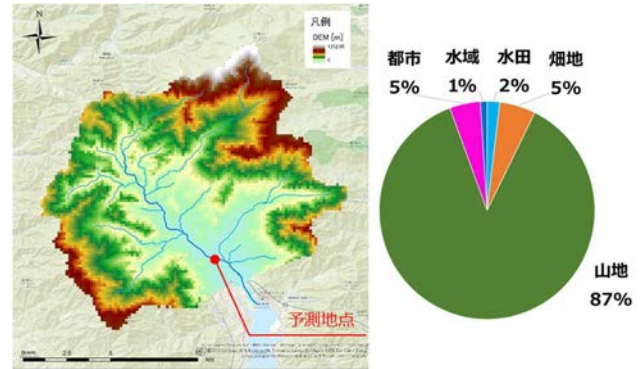


図-4 S川流域図と土地利用割合

4. 実河川への適用

(1) S川における適用効果の検証

ここでは実降雨を対象に、気象庁解析雨量を降雨量とし樹冠遮断モデルで有効雨量を求める。つまり解析雨量が1kmメッシュの降雨分布を表現できることから、樹幹遮断モデルもメッシュ毎に異なる状態量を保持することで有効雨量の降雨分布を出力することができる。この有効雨量をS川のRRIモデルの境界条件として入力することで予測地点における水位波形の効果を確認する。なお、RRIモデルから求める流出量を河川水位に変換するためにH-Q式を用いており、これは流量観測から作成された関係式である。

a) S川RRIモデルの構築

東北地方に位置する二級水系S川を対象とし、以下の条件でRRIモデルを構築した（図-4参照）。

流域面積：129 [km²] / 流路延長：約17 [km]

地形データ：日本域表面流向マップ

空間解像度：5秒（約150 [m]）

土地利用データ：国土数値情報土地利用細分メッシュ

土地利用割合：山地87%、畑地5%、水田2%、その他6%

なお、蒸発散は樹冠遮断モデルで考慮するため、RRIモデルでは無効とした。

b) 樹冠遮断を考慮したS川の再現計算

樹幹遮断モデルから有効降雨を作成し、S川RRIモデ

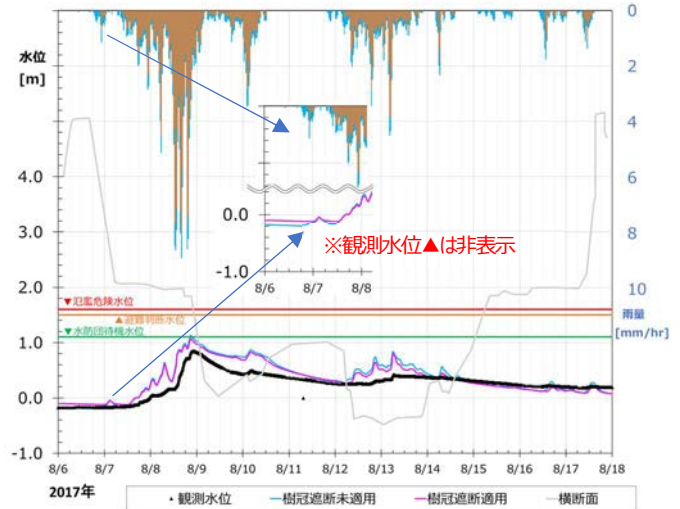


図-5 S川における再現計算結果（2017年の出水）

ルで再現計算した結果を図-5に示す。なお、当該出水は水防団待機水位にも満たない小出水であるが、本研究で用いる樹幹遮断モデルはタンクが満水になると降雨量から蒸発散量を差し引いた値の8%が損失されるため、タンク飽和時のハイドログラフはピークが一定量過小評価された波形になる。そのためここでは有効降雨の評価や洪水波形への影響を評価するため小出水に着目している。

まず降雨初期に着目する。降雨開始後、それぞれのタンクに貯留され、全降雨に対し有効降雨は小さくなっている。その影響を受け、水位波形の立ち上がりのタイミングも遅くなっていることがわかる（図-5の拡大図より）。タンクが満水後は降雨量に応じた損失のみであるため、樹幹遮断を適用した方が若干水位が低くなってい

る。また、水位低減部では若干ながら樹冠遮断を適用した方が水位低下は遅い。これは蒸発散量をRRIモデルの状態量(斜面水深 h_s)から差し引く方法から、樹冠遮断モデルのそれぞれのタンクから差し引く方法に変更したため、タンクが空になった場合に差し引くものがないためと考えている。無降雨が続くことによって蒸発散量がなくなることについては今後の課題と考えている。当該イベントの相関係数は樹冠遮断を考慮しない場合には0.939であり、考慮することで0.945に向上している。したがって樹冠遮断モデルをRRIモデルに結合することの有効性を示すことができた。

(2) 全国55河川での検証

全国55河川を対象に樹冠遮断モデルの適用性を検証した。河川毎に複数の洪水イベントがあるため、合計140イベントが対象となる。また、本研究で用いたRRIモデルパラメータは河川毎にキャリブレーションした値でないため、評価指標は絶対誤差ではなく相関係数で洪水波形が向上するかを評価した。その結果、樹冠遮断モデルの導入することによって洪水波形が向上したイベントは98イベント(全体の70%)、逆に低下したイベントは42イベント(全体の30%)あった。42イベントの内訳をみると同一河川であっても洪水波形が向上するイベントと、そうでないイベントがあり、降雨イベントの規模や解析雨量の精度が影響しているものと考えられる。

5. 結論と今後の課題

本研究ではRRIモデルで取り扱う降雨が斜面水深に直接到達することに着目し、山地河川では樹冠遮断を考慮することで洪水の立ち上がりや中小規模出水の再現性が向上するか検証した。樹冠遮断モデルはモデルパラメータが明確で簡便なSuzuki(1980)の手法をそのまま適用した。得られた結論は以下の通りである。

- ・ 樹冠遮断モデルは初期損失やピークでの損失を表現できる。
- ・ 樹冠タンクの状態量は17.5時間で初期化される(樹冠タンクはそれより早いタイミングで初期化)。
- ・ 初期損失の影響により立ち上がり部のタイミングが鈍化されるため、中小規模で敏感に反応するRRIモデルの再現性を向上させられる可能性がある。
- ・ 全国55河川・140イベントを対象に検証した結果、全体イベントの70%で相関係数が向上することを確認した。

本研究では全国を同一パラメータで算出しているため、今後は植生分布などを考慮できるパラメータの感度分析

や蒸発散の取り扱いを検討する予定である。また、精度向上しなかった30%のイベントについてその要因を分析する。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、京都大学防災研究所の佐山准教授と山田助教には学術的な視点からご指導いただいた。ここに感謝を意を記す。

参考文献

- 1) 小杉賢一郎: 森林の「ダム」機能の科学的評価の試み, 水利科学, Vol.48-6, pp.18-31, 2005.
- 2) 木村俊晃: 貯留関数法(II)~(IV-2), 土木技術資料, 4(1,4,5,6,7), 1962.
- 3) 陸受校, 小池俊雄, 早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, 第411号/II-12, 1989年11月.
- 4) 立川康人, 永谷言, 寶馨: 飽和・不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 第48巻, 2004年2月.
- 5) T. Sayama: Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) Technical Manual, Technical Note of PWRI, No. 4277, Public Works Research Institute, 2014.
- 6) 小尻利治, 東海明宏, 木内陽一 (1998): シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発, 京都大学防災研究所年報, B, 第41号B-2号, pp.119-134, 1-Apr-1998.
- 7) Wang, L., T. Koike, K. Yang, and P. Yeh (2009): Assessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, Journal of Hydrology, 377, 21-34, 2009.
- 8) 柿沼太貴, 沼田慎吾, 望月貴文, 大沼克弘, 伊藤弘之, 安川雅紀, 根本利弘, 小池俊雄, 池内幸司: 中小河川を対象とした洪水時におけるリアルタイム水位予測システムの開発に向けた研究, 土木学会河川技術論文集, 第27巻, pp.105-110, 2021年6月.
- 9) Masakazu Suzuki: Evapotranspiration from a Small Catchment in Hilly Mountains (I) Seasonal Variations in Evapotranspiration, Rainfall Interception and Transpiration, J. Jpn. For. Soc. 62:46-53, 1980.
- 10) 児島利治, 篠田成郎, M. Golam, MAHBOOB, 大橋慶介: 降雨遮断モデルによる実時間洪水予測精度の高度化に関する検討, 河川技術論文集, 第18巻, pp.435-440, 2012年6月.
- 11) Giorgio Baiamonte: Simplified Interception/Evaporation Model, Hydrology 2021, 8(3), 99, 2021.
- 12) 村上茂樹, 北村兼三: 高密度林分では大雨時に樹冠遮断が増加する, 水文・水資源学会/日本水文学会 2021年度研究発表会, 要旨集, 2021年.
- 13) Seonghun Jeong, Tomonori Kume, Yoshinori Shinohara, Moein Farahnak, Kyoichi Otsuki: Application of the Reformulated Gash Analytical Model for Rainfall Interception Loss to Unmanaged High-Density Coniferous Plantations Laden with Dead Branches, Forests 2022, 13(5), 657, 2022.
- 14) 近藤純正, 中園信, 渡辺力, 桑形恒男: 日本の水文気象(3): 森林における蒸発散量-, 水文・水資源学会誌, Vol.5, No.4, 1992.