

# 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

## STUDY ON IMPROVEMENT OF REAL-TIME FLOOD FORECASTING WITH RAINFALL INTERCEPTION MODEL

児島利治<sup>1</sup>・篠田成郎<sup>2</sup>・M. Golam MAHBOOB<sup>3</sup>・大橋慶介<sup>4</sup>  
Toshiharu KOJIMA, Seiro SHINODA, M. Golam MAHBOOB and Keisuke OHASHI

<sup>1</sup>正会員 博(工) 岐阜大学准教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 岐阜大学教授 総合情報メディアセンター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

<sup>3</sup> M.S. Agroforestry, Graduate School of Gifu University (〒501-1193 Yanagido 1-1, Gifu)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 岐阜大学助教 工学部 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

The risk of heavy rainfall is emphasized and real-time flood prediction is become to an important method for river management. It is most important problem to predict discharge ratio / effective rainfall which is different in each event for more improvement of real-time flood prediction. Infiltration capacity, fixed rate etc. are used well in order to determine effective rainfall. On the other hands, rainfall interception in Japanese forest is 10 to 25 %. It is an important factor to affect to discharge ratio, however, not emphasized in rainfall-runoff analysis. In this paper, the advancement of prediction method of effective rainfall with rainfall interception model is investigated. The distributed rainfall interception model considered evaporation process based on micro meteorological situation and forest structure is developed. The direct discharge ratios, which are obtained by observed hydrograph separation, are compared with the simulated results by the interception model for 10 rainfall events in 2009. Positive relationship ( $R=0.90$ ) was shown between observed and simulated discharge ratio for the events without previous rainfall, i.e. almost never influence of infiltration loss. It was found that the possibility of prediction of discharge ratio using interception model. The improvement of real-time runoff prediction is expected with consideration of the interception method proposed in this paper.

**Key Words :** discharge ratio, effective rainfall, PAI, airborne laser scanner

### 1. はじめに

近年、気候変動の影響による集中豪雨の危険性が重要視されてきており、実時間での洪水流出予測は河川管理上重要な技術となってきた。洪水流出予測には貯留関数法、等価粗度法を初めとする様々なモデルが提案、実用化されており、有効降雨量が既知かつ良好なモデルパラメタが同定できれば極めて高精度な流出予測が可能となっている<sup>1)</sup>。また、予測結果と観測結果を実時間で比較、モデルを適時修正する実時間流出予測モデルも提案されている<sup>2)</sup>。このような現状より、実時間洪水予測のさらなる精度向上には、降雨イベントごとに異なる有効雨量、流出率をいかに精度よく予測するかが大きな課題の一つと考えられる。有効雨量の算出には浸透能式等の浸透を考慮した方法や流出率を定率とする方法が良く

利用される。森林土壌中の遅い中間流による流出の遅れを考慮した流出モデルも提案されている<sup>4)</sup>。一方、我が国の森林における降雨遮断率は10~25%と有効雨量に大きく影響する要因であるが、洪水流出解析ではあまり重要視されてこなかった。流域スケールでの降雨損失の評価には、流域内のどこで、どの程度損失するかという空間分布を考慮した解析が必要である。流域スケールの空間分布情報取得には、現地測量、現地観測は不向きであり、衛星画像や空中写真などのリモートセンシングデータの活用が期待される。土壌浸透による降雨損失は土壌条件に影響されると考えられる。しかし、我が国の山地流域はその多くが森林で覆われており、林冠より下にある土壌の情報を得ることは容易ではない。一方で、樹冠遮断には樹冠疎密度などの林分構造が深く影響すると考えられる。これらの分布情報はリモートセンシングデータにより取得できる可能性が極めて高い。また、気象要

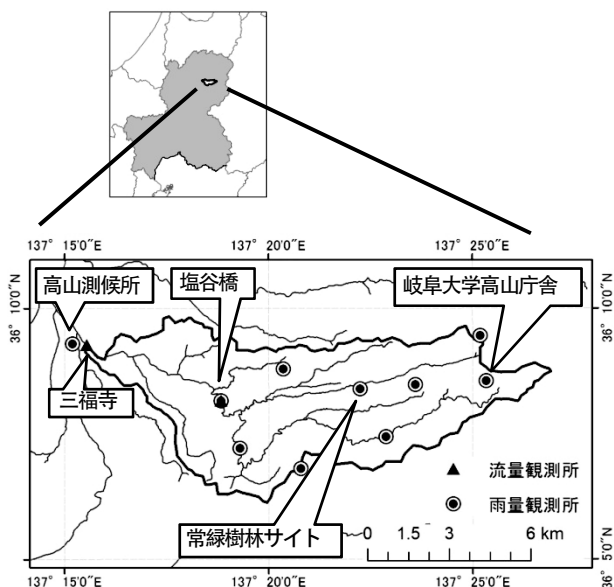


図-1 対象流域と水文データ観測所の位置

素に関しても気象モデルや陸面過程モデルにより、流域スケールでの詳細なデータを取得できる可能性が高い。本研究では、気象条件に基づく遮断蒸発過程を考慮した降雨遮断モデルを構築し、観測ハイドログラフの分離により算出した直接流出成分と降雨遮断モデルにより算出した正味降水量（総雨量 - 遮断損失量）の比較、遮断モデルによる有効降雨予測の高度化に関する検討を行う。

## 2. 対象流域と水文データの観測状況

岐阜県高山市の神通川水系大八賀川流域を対象流域とする。大八賀川は、日影平山（標高1,595m）を水源として山間部を西流し、下流部において高山市街地を流下して宮川右岸に合流する流域面積60.4km<sup>2</sup>、河川延長20kmの一級河川である。流域の土地被覆としては、都市域、耕作地を含む裸地が19%、常緑針葉樹林41%、落葉針葉樹林2%、落葉広葉樹林が37%と常緑樹、落葉樹がほぼ同面積を占めている。年平均降水量は約1,800mm。岐阜県県土整備部宮川上流河川開発工事事務所により、三福寺地点において流量を、塩谷橋地点において流量と降水量の観測が行われている。本流域は、岐阜大学流域圏科学研究センター、筑波大学、産業総合研究所等の共同による気象・生態系の集中観測が実施されており、流域内の常緑針葉樹林においてフラックス観測タワーが設置され詳細な気象、生態系観測が実施されている。常緑針葉樹林サイト（以下TKC）では、林床に24個の雨量計（Davis製、精度0.2mm）を設置し、フラックスタワー上に設置された雨量計（池田計器製、精度0.5mm）による林外雨量との比較により、樹冠遮断現象の観測を実施している。また、上流域に位置する岐阜大学流域圏科学研究センター高山庁舎のAWSによる自動気象観測、及び

流域内6カ所に設置された簡易雨量計による高密度な気象観測が実施されている。さらに宮川への合流地点付近に気象庁高山測候所があり、降水量、気温、湿度などの気象要素が観測されている。また、林床の直上をどの程度樹冠が覆っているかの指標である樹冠疎密度や単位面積あたりの葉面積、枝・幹面積を示すPAI(Plant Area Index)は、遮断に大きく影響する指標と考えられるが、TKCにおける樹冠疎密度は、2006年11月に魚眼レンズを用いた全天写真により0.59という値が計測されている。

## 3. 一次元降雨遮断モデル

### (1) 降雨遮断モデルの概要

図-2のような樹冠に衝突した飛沫水滴の蒸発<sup>5)</sup>を考慮した、多層タンク型の鉛直一次元降雨遮断モデルの構築を行った。対象域への降雨(林外雨 $r_g$ [mm/h])は、樹冠の隙間を通過して直接林床に到達する降雨（直達雨 $r_{dir}$ [mm/h]）と最上位の第1樹冠タンクに供給される降雨 $r_{crwn,1}$ [mm/h]に分けられる((1)式参照)。直達雨は樹冠疎密度 $D_{crwn}$ [無次元]に従って、(2)式のように算出される。

$$r_g = r_{dir} + r_{crwn,1} \quad (1)$$

$$r_{dir} = (1 - D_{crwn}) r_g \quad (2)$$

第1樹冠タンクへ供給された降雨は、一定割合( $c_{spl}$ [無次元])が飛沫水滴 $r_{spl,1}$ [mm/h]となり空气中へ供給される。

$$r_{spl,1} = c_{spl} r_{crwn,1} \quad (3)$$

空气中へ供給された飛沫水滴の一部は、気温 $T_a$ [°C]にしたがって蒸発損失される。ここで、 $b_{spl}$ [mm/h/°C]は飛沫水滴の蒸発効率である((4)式参照)。

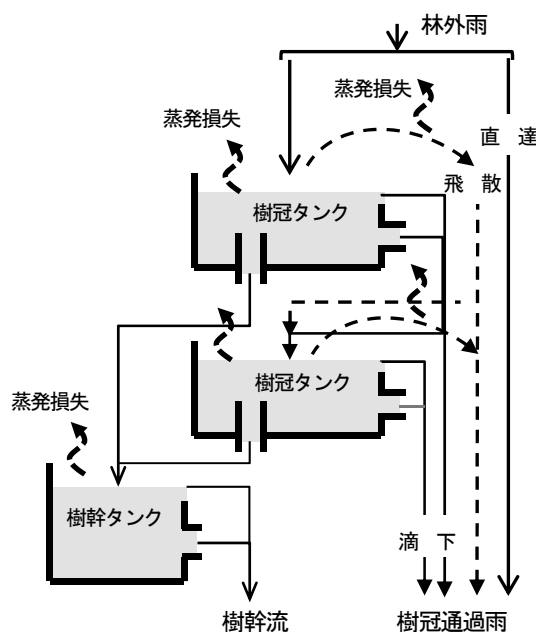


図-2 樹冠遮断モデルの概念図

$$e_{spl.1} = b_{spl} T_a \quad (4)$$

樹冠タンクでは、タンクの水位 $h_1$  [mm] がある一定以上、すなわち樹冠に雨滴が充分付着すると、下方への滴下雨 $r_{drp.1}$  [mm/h]及び樹幹流 $r_{stm.1}$  [mm/h]が発生する。

$$r_{drp.1} = a_{drp} (h_1 - h_{drp.1}) \quad (5)$$

$$r_{stm.1} = a_{stm} (h_1 - h_{stm.1}) \quad (6)$$

ここで、 $h_{drp.1}$ 、 $h_{stm.1}$ は、それぞれ滴下雨、樹幹流の発生開始水位[mm]、 $a_{drp}$ 、 $a_{stm}$ はそれぞれ滴下雨、樹幹流の流出係数[h<sup>-1</sup>]である。樹冠表面からの蒸発 $e_{leaf.1}$ は、(4)式と同様に気温 $T_a$ と樹冠からの蒸発効率 $b_{leaf}$ に依存して決定される。

$$e_{leaf.1} = b_{leaf} T_a \quad (7)$$

以上の樹冠遮断過程を経て、樹冠タンクの水位 $h_1$ は(8)式のように決定される。

$$\frac{dh_1}{dt} = r_{crwn.1} - r_{spl.1} - r_{drp.1} - r_{stm.1} - e_{leaf.1} \quad (8)$$

また、タンクの水位がある一定以上の水位 $h_{over.1}$  [mm]を超える程の豪雨が発生した場合は、オーバーフローによる滴下雨 $r_{over.1}$  [mm/h]が発生する。ここで $dt$  [h]は計算時間間隔である。

$$r_{over.1} = (h_1 - h_{over.1})/dt \quad (9)$$

第2タンクへの供給 $r_{crwn.2}$ [mm/h]は、第1タンクからの滴下雨、飛沫水滴を合計して(10)式のように算出され、第1タンクと同様に滴下雨、飛沫水滴、樹幹流が算出される。

$$r_{crwn.2} = D_{crwn} (r_{drp.1} + r_{over.1} + r_{spl.1}) \quad (10)$$

以上より、林床へ到達する樹冠通過雨量 $r_i$  [mm/h]は、直達雨と各タンクからの滴下雨、飛沫水滴を合計して、(11)式のように算出される。

$$r_i = r_{dir} + \sum_k^n \{ (1 - D_{crwn}) (r_{drp.k} + r_{over.k} + r_{spl.k}) \} \quad (11)$$

ここで、 $k$  は樹冠タンクの番号、 $n$  は樹冠タンク数である。各樹冠タンクから出力される樹幹流 $r_{stm.k}$  [mm/h]は、樹幹タンクへまとめられ、樹冠タンクと同様な手法による樹幹表面からの蒸発、樹幹流下量の決定がされる。蒸発に関しては、湿度、風速、日射などの影響を受けるが、本研究では、流域全体に拡張することを考慮し、分布情報が得ることが容易な気温のみに関係するモデルとした。

## (2) モデルパラメタの同定

2009年~2010年のTKCサイトにおける水文観測データを用いて、モデルパラメタの同定を行った。同定するモデルパラメタは、樹冠・樹幹タンクの流出孔の高さ及び流出係数、越流高、樹冠タンクにおける雨水の飛散率、及び蒸発効率等である。実測された樹冠通過雨量、樹幹

流下量の各時間ステップでの積算値の誤差が最小となるように各パラメタの値を同定した。常緑針葉樹林であるTKCサイトではPAIは約5.5(m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)で季節変動していないことが観測されており<sup>6)</sup>、樹冠疎密度も季節変動しないとして、全ての解析対象イベントに対して0.59を用いた。

## (3) 1次元遮断モデル解析結果

図-3に最適化されたモデルパラメタを用いたシミュレーション結果を示す。上図は林外雨のハイトグラフ、下図は林床へ到達する正味林内雨量 (= 樹冠通過雨量+樹幹流下量) の積算値である。図-3(a)に示すように、イベント開始から終了まで極めて高精度で樹冠遮断現象が再現されている。図-4に総降雨量10mm程度の小規模な降雨イベントから60mm程度の11イベントでの観測・推定正味林内雨量、及び遮断率 (= 1 - 正味林内雨量/林外雨量) の比較結果を示す。正味林内雨量での比較(図-4(a))では $R = 0.98$ と良好な精度で推定できている。総林外雨量を用いて遮断率に変換した比較結果(図-4(b))では、 $R = 0.36$ と弱い明瞭な正の相関が得られ、降雨イベントごとに異なる遮断率が再現可能であることが示唆された。一方で、図-3(b)のような降雨強度が比較的小さい長期イベントや図-3(c)のような豪雨イベントにおいて、若干過小推定、過大推定される場合がある。11イベント中、林内雨の推定誤差が2mmのイベントを抽出すると、最大降雨強度が1.6, 1.7mm/10minの2イベントが過少評価、1.9, 3.3, 4.2mm/10minの3イベントが過大評価された。シミュレーション誤差には林内雨の観測誤差による影響が極めて大きいと考えられるが、このような降雨強度による傾向も見受けられ、モデルパラメタの微調整の必要性が若干残されている。

## 4. 二次元分布型降雨遮断モデルへの拡張

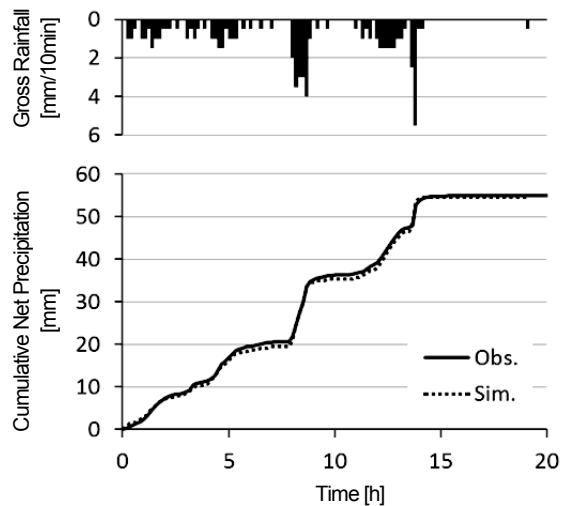
流域を50×50mのセルに分割し、セルごとに前述の1次元降雨遮断モデルを用いて遮断損失量の推定を行うことにより流域全体の降雨遮断と有効雨量を推定する。

### (1) 分布パラメタ

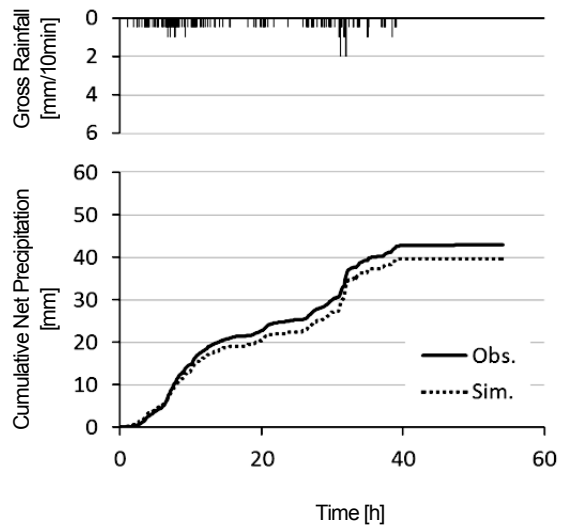
前章で同定したモデルパラメタは本来であれば林種、樹種ごとに異なると考えられるが、本研究では常緑針葉樹林サイトにおける水文観測データのみで解析を行っているため、流域内全域で同一の値を用いることとし、以下の4種のデータを分布パラメタとして各セルで異なる値を用いることとする。

#### a) 樹冠疎密度分布

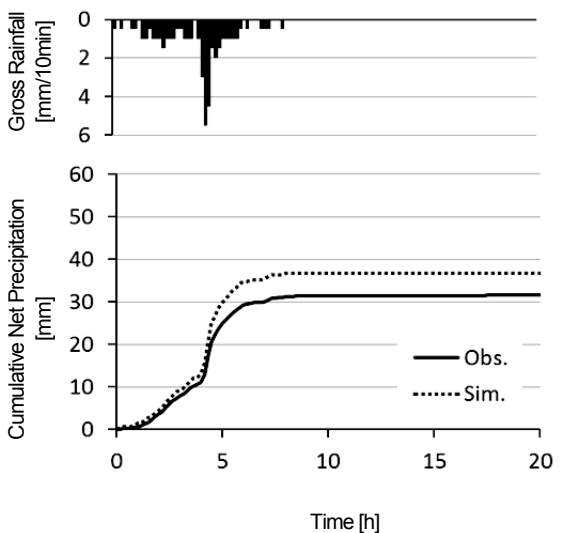
岐阜県ふるさと地理情報センターでは、県域統合GISの共有空間データとして、県内全域の航空機レーザースキャナデータを整備している<sup>7)</sup>。対象流域周辺は2003年10月に撮影され、点密度は約2mに1点程度である。本



(a) Event1

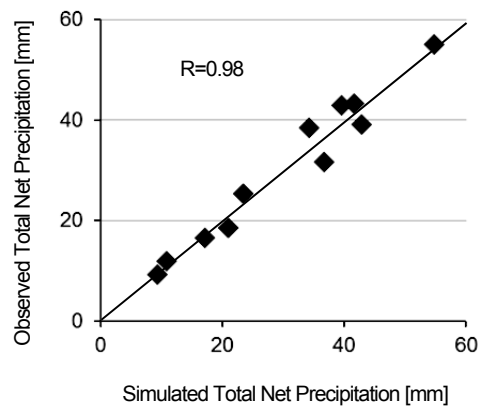


(b) Event2

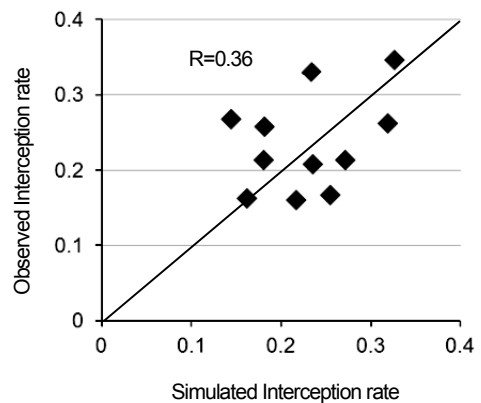


(c) Event3

図-3 樹冠遮断現象のシミュレーション結果



(a) 正味林内雨量 (=樹冠通過雨量+樹幹流下量)



(b) 遮断率

図-4 樹冠遮断現象の観測値と推定値の比較

レーザースキャナデータより以下の手法により樹冠疎密度分布を算出した。まず、レーザースキャナデータのフィルター処理により作成された2m解像度のDEMより地表面高を算出する。算出された地表面高より3m以上上空に位置するレーザ反射点は樹冠上で反射し、地表面高より3m未満に位置する反射点は地表面で反射したと判断する。樹冠上で反射した点と地表面で反射した点の密度により、当該セルの樹冠疎密度を推定した。レーザースキャナデータを用いることにより樹冠疎密度の空間分布を得ることはできた。一方で、春季、夏季などの異なる季節に撮影されたデータを用いておらず樹冠疎密度の季節変動効果を遮断のシミュレーションに取り込むことができていない。如何に樹冠疎密度の時空間変動情報を得るかは、今後の重要な課題の一つである。

#### b) 降雨量分布

図-1で示した流域内10カ所に設置した雨量計による観測結果を用いて、以下の距離重み付内挿法により降雨量分布を推定した。

$$r_i = \frac{\sum_j^N w_{ij} r_{obs,j}}{\sum_j^N w_{ij}} \quad (12)$$

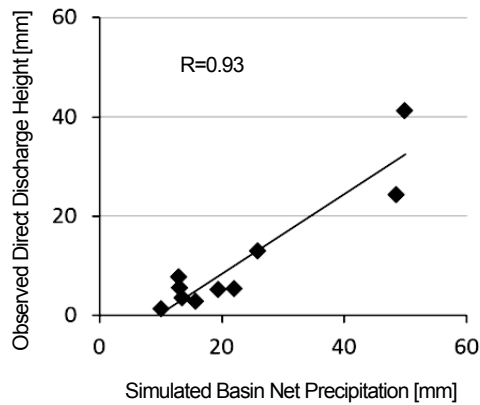


図-5 直接流出高と流域平均正味林内雨量の比較。

$$w_{ij} = 1/d_{ij}^2 \quad (13)$$

ここで、 $r_i$ ：セル*i*の雨量， $r_{obj}$ ：雨量計*j*での雨量， $d_{ij}$ ：セル*i*と雨量計間の距離， $N$ ：雨量計数である。

#### c) 気温分布

気象庁高山測候所，TKC，岐阜大学高山庁舎での観測結果，及び標高データを用いて，以下の手法で流域内の気温分布を求めた。標高データは国土地理院発行の数値地図50 mメッシュ（標高）を用いた。まず，3つの観測所の標高と観測気温を用いて標高*z*から気温*T<sub>a</sub>*を求める線形式を求める。

$$T_a = \hat{a} + \hat{b}z \quad (14)$$

ここで， $\hat{a}$ ， $\hat{b}$ は，3地点の気温データより求めた線形式の係数*a*，*b*の最良推定値である。各セルの標高*z<sub>i</sub>*を標高データより得，上式を用いて気温*T<sub>a,i</sub>*を求める。

#### d) 地表面被覆

レーザースキャナデータより推定した樹冠疎密度分布は，レーザ反射の位置を用いて解析しているため建造物も樹冠としている箇所がある。本研究では都市域では都市キャノピーによる遮断損失は発生しないと仮定しているため，都市域の遮断は0としたい。そこで，環境省の生物多様性センターで提供されている自然環境情報GISシステムの植生調査データより，都市域と植生域を区別する地表面被覆分布データを作成した。

### (2) 正味林内雨量の推定

2009年に観測された10イベントに対して分布型遮断モデルを適用し，総降雨量より遮断量を除いた正味林内雨量を流域全体において求めた。各降雨イベントの直接流出高は，各流出ハイドログラフを直接流出成分と基底流出成分に分離して求めた。図-5に直接流出高と推定された流域平均正味林内雨量の比較を示す。ハイドログラフの分離によって求めた直接流出高は地下水への浸透による損失分があるため，図-4(a)より相関係数の値は低い

が，非常に良い相関が得られた。

## 5. 流出率による比較

ハイドログラフより求めた直接流出高と遮断モデルより求めた流域平均正味林内雨量を流域平均雨量で除し，各イベントの観測流出率と推定流出率を求めたところ，弱い正の相関が見られた(図-6参照)。一方で，ハイドログラフより求めた観測流出率は0.1弱から0.4強の間で広く分布しているが，推定流出率は0.5弱から0.6弱の狭い範囲のみしか値を示しておらず，イベント毎の遮断率の違いがあまり再現できていないことが分かる。本研究で用いた分布型遮断モデルは，i) 樹冠疎密度の季節変化を取り入れてない，ii) モデルパラメタは常緑針葉樹林での観測結果のみで同定したものである，iii) 遮断蒸発に関わる微気象条件の分布を気温のみしか用いていないという点がまだ不十分であり，イベントごとの遮断率の違いがまだ再現しきれておらず，推定遮断率の幅が0.1程度に収まったと考えられる。また，図-6におけるプロットのばらつきは，遮断以外の流出率に関係する要因，すなわちイベント前の土壌水分条件による影響が大きいと考えられる。そこで図-7のように，降雨イベント前の前

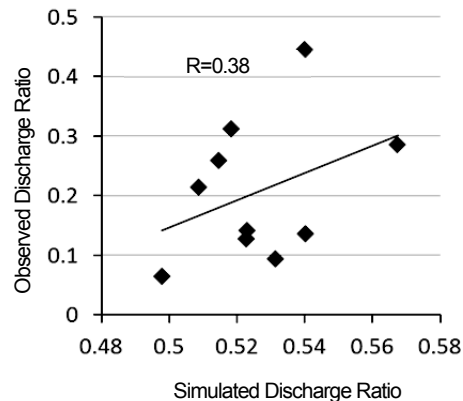


図-6 観測流出率と推定流出率の比較。

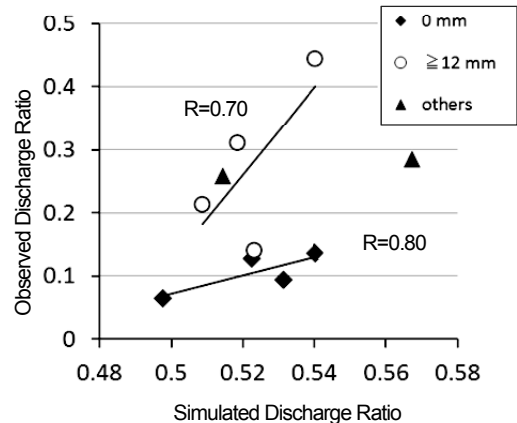


図-7 直接流出率と推定有効降雨率の比較（前3日間降水量で分類）。

3日間降水量が無降雨(0mm)と12mm以上のイベント、及びそれ以外に分けてプロットした。前3日間降水量が0mmのイベントは黒四角で表示し、12mm以上のイベントは白丸、それ以外のイベントは黒三角で表示している。前3日間降水量が0mmのイベントは、土壌への浸透による損失が大きく観測流出率が0.06から0.14程度と低い値を示した。これらのイベントは、土壌水分条件がほとんど同じと仮定でき、流出率のばらつきは遮断による影響が大きいと考えられる。実際に観測流出率が示す値の幅も0.08程度と推定流出率が示す値の幅とほぼ同等であった。前3日間降水量が12mm以上のイベントでは、先行降雨により流域全体の土壌水分量が增大、地下水位が増加しているため、比較的高い直接流出率を示した。また、前3日間降水量は12mmから67.5mmとイベント毎に大きく異なり、流域の土壌水分状態にも大きな違いがあると考えられ、観測流出率の値に大きな幅がでていると考えられる。先行降雨が0mm、12mmのイベントにおける観測流出率 $f_{obs}$ と推定流出率 $f_{sim}$ 関係をそれぞれ(15)式、(16)式に示す。

$$f_{obs} = 1.45f_{sim} - 0.65 \quad (15)$$

$$f_{obs} = 6.53f_{sim} - 3.13 \quad (16)$$

それぞれの相関係数は、 $R = 0.80, 0.70$ と高い正の相関を示した。特に先行降雨の影響の低い(15)式では高い相関を示し、土壌浸透による降雨損失の予測と合わせて用いることにより、より精度の高い流出率の予測が可能になると思われる。本研究では、ほとんど無降雨と比較的大量の先行降雨があったイベントが解析対象であったため2つのグループに分けられたが、より多くのイベントを解析対象にすることで、先行降雨量をパラメタに取り入れた $f_{obs} - f_{sim}$ 関係を求めることも可能と考えられる。

## 6. おわりに

本研究は、実時間洪水予測の精度向上を目的として、イベントごとに異なる流出率を実時間で予測する手法の検討を行った。現地観測より得られた詳細な樹冠遮断モデル基礎とし、航空機レーザースキャナより得られた樹冠疎密度分布、植生タイプ分類図、降雨分布、気温分布を分布情報として用いた分布型遮断モデルにより、流域正味林内雨量を求め、ハイドログラフより求めた直接流出率と比較したところ、先行降雨の有無で場合分けした場合、極めて高い正の相関を示した。流出率のばらつきの幅から、樹冠遮断による流出率のばらつきは、先行降雨量による流出率のばらつきの1/4程度と考えらる。先行降雨・浸透による降雨損失を予測するモデルと本研究の遮断モデルを組み合わせることにより、より精度高く実時間での有効降雨の予測が可能になると期待できる。

本研究では、Dell Optiplex 980 (Core i7 2.93 GHz, 4GB RAM) に、Cygwin, gfortranをインストールし、OpenMPにより並列計算を行った。対象領域(60km<sup>2</sup>)を50mグリッドに分割し、9つの対象イベントのシミュレーション(計875h)に要した計算時間は、実時間1時間に対しデータIOの時間を含めても0.25秒であった。有効雨量の推定部分のみのモデルであれば、実時間による流出予測に対して十分対応できる計算速度であると考えられる。

**謝辞：**本研究は、平成17～19年度科研費補助金（若手研究(B), 17760403, 研究代表者：児島利治）、平成22～23年度科学研究費補助金（挑戦的萌芽, 22651012, 研究代表者：篠田成郎）、平成22～23年度科学研究費補助金（基盤研究(A), 研究代表者：栗屋善雄）、地球環境再生プログラム「中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生をめざす大学間関連事業」の補助を受けて実施されました。航空機レーザーについては、岐阜県ふるさと地理情報センターより、大八賀川の観測流量データについては、岐阜県県土整備部宮川上流河川工事事務所よりご提供頂きました。また降雨データ、気象データ取得において岐阜大学高山試験地の車戸憲二氏、宮本保則氏および高山コミュニティの皆様にも多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会水理委員会編：水理公式集 平成11年版，丸善，pp.38-44, 1999.
- 2) 立川康人，佐山敬洋，可児良昭，宝 馨，松浦秀起，山崎智也：広域分布型洪水流出モデルを用いた実時間流出予測システムの開発と淀川流域への適用，京都大学防災研究所年報，No. 49 B, pp. 13 - 26, 2006.
- 3) Sunmin KIM, Yasuto TACHIKAWA, Kaoru TAKARA: Flood Forecasting System Using Weather Radar and a Distributed Hydrologic Model, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 49 B, pp. 55 - 65, 2006.
- 4) 立川康人，永谷 言，寶 馨：分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価，京都大学防災研究所年報，No. 46 B-2, pp. 233 - 248, 2003.
- 5) Shigeki MURAKAMI: A proposal for a new forest canopy interception mechanism: Splash droplet evaporation, *Journal of Hydrology*, No. 319, pp. 72-82, 2006.
- 6) Shin NAGAI et al.: In situ examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan, *Int. J. Remote Sensing*, 2012.(accepted)
- 7) 日本スペースイメージング株式会社：高精度衛星デジタルオルソ画像データおよび標高データ整備委託作業実施報告書，平成15年12月，2003.

(2012. 4. 5受付)