

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

SEPARATION OF INTERCEPTION EVAPORATION, TRANSPIRATION
AND NON-OVERLAND-FLOW IN A FORESTED WATERSHED

端野道夫¹・田村隆雄²・田淵昌之³・富士川洋一⁴

Michio HASHINO, Takao TAMURA, Masashi TABUCHI and Yoichi FUJIKAWA

¹フェロー 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1)

²正会員 博士(工学) 高松高専講師 建設環境工学科 (〒761-8058 高松市勅使町 355)

³正会員 工修 (株)建設技術研究所 大阪支社河川部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

⁴フェロー 工修 (株)建設技術研究所 大阪支社河川部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前 1-2-15)

A method of separately estimating daily rainfall-interception evaporation and transpiration in forested watersheds is proposed using available 365-daily data of temperature, relative humidity and sunshine duration, as well as rainfall-runoff. A non-linear interception model is developed, and restraints of transpiration under the conditions of low-flow and high pressure deficit of saturation vapor are considered. In order to evaluate the storage depth of non-overland-flow separated from observed runoff depths, a runoff-tank model with separated overland-flow is used. The parameter identification of the runoff-tank model is made using storm hourly data of rainfall-runoff besides 365-daily data of temperature, relative humidity, estimated radiation and rainfall-runoff. The maximum storage depth of non-surface flow for a heavy storm with a daily rainfall depth of 391mm in the Okunoi experimental watershed is found to be 98 mm, while interception and overland-flow depths are 71 and 208mm, respectively, that are 18 and 52% of the total rainfall depth.

Key Words : *interception evaporation, transpiration, forested watershed, non-overland-flow, runoff tank model with separated overland-flow, parameter identification*

1. はじめに

森林流域は、荒廃裸地流域に比べて、洪水低減・渇水緩和機能が低いことは経験的によく知られているところであるが、森林流域からの遮断蒸発量と蒸散量を分離して推定する実用的な式と方法が少なかったこともあり、洪水解析や低水解析の実務では、降水日の遮断蒸発量と無降水日の蒸散量をきっちりと分離して扱うことは希であった。しかしながら、洪水解析において遮断蒸発を無視することは、直接流出に対する有効降雨量と浸透損失量を過大評価することになる。また、長期の低水解析において降水日遮断蒸発量と無降水日蒸散量の和としての蒸発散量を、すべて無降水日に発生させると、推定された流況曲線(豊水量, 平水量, 低水量, 渇水量)は実際とは異なる恐れがある。さらには、流出解析に森林の遮断蒸発と蒸散を的確に分離したものを用いなければ、たとえ表面流分離可能な流出解析モデルを使用したとしても、

流域地中保水量の妥当な評価はできない。

こうした観点から、本論文では、1年間の日単位の降水量、流量及び気象(気温、湿度、日照時間)データと主な洪水の時間単位の降水量及び流量データを用い、年間水収支と洪水ピーク流量の再現性について配慮した、日遮断蒸発量、日蒸散量の推定モデルと表面流分離直列2段タンクモデルのパラメータ同定法を提案する。この方法を吉野川流域に設定された一つの森林試験流域の観測データに適用し、年間及び主な洪水期間についての水収支の内訳(降水量、遮断蒸発量、蒸散量、表面流出量、地中水流出量等)を示すとともに流域地中保水量の限界を明らかにする。

2. 森林の遮断蒸発量と蒸散量の実用的推定式

(1) 遮断蒸発量

現地観測によれば、林外雨量と林内雨量(樹冠通過雨量+樹幹流量)の差で定義される樹冠遮断蒸発量

I (mm) は、降雨量 P が 300–400mm に達しても発生している¹⁾。しかし、降雨開始後、ある臨界降雨量 P_c までは、遮断蒸発率 I/P は急激に低下し、 P が P_c 以上になると、 I/P はほぼ一定となる。こうした非線形的傾向は、針葉樹に限らず、広葉樹でも観測されており、変数増減法による回帰分析により、実用に耐える次式（重相関係数 0.963 以上）を得た²⁾。

$$I = C \exp(a_\theta \theta + a_H H + b_P \ln P) P, (P \leq P_c) \quad (1a)$$

$$I = C \exp(a_\theta \theta_c + a_H H_c + b_P \ln P_c) P, \quad (P \geq P_c) \quad (1b)$$

ここに、 θ, H, P : それぞれ、降雨開始後からの積算平均気温、積算平均飽差、積算降雨量； a_θ, a_H, b_P, C : 回帰係数及び定数であり、 θ, H の添え字 c は P が臨界降雨量 P_c を超えた時刻における θ, H の値を示す。この式の回帰係数は、単木に対するものであるが、 C と P_c 以外の回帰係数 a_θ, a_H, b_P は、流域平均の遮断蒸発量推定に、そのまま用いることにし、後述の年間流域水収支計算から同定するパラメータは C と P_c とする。また、簡単のため、日単位の降水量、平均気温、平均飽差のデータに式(1)を用いて日遮断蒸発量を推定し、主な洪水時の時間降雨量に対する時間遮断蒸発量は、日降雨量に対する時間積算降雨量の比で配分する。

なお、遮断蒸発量は、純放射量の数倍にもなることがあり、単純な鉛直方向のみの熱収支理論では説明ができないことが分かっている¹⁾。これについては、樹冠の多層構造と葉面で衝突・飛散した水滴の乱流輸送等が関係していると考え、別途、研究を進めていることを付記して置く。

(2) 日蒸散量

流域における日蒸散量 e_T (mm) は、日純放射量 R_n (mm) に蒸散係数 ϕ を乗じることとし、蒸散係数 ϕ は土壌水分不足と飽差による蒸散抑制を受けるものとする³⁾。しかし、流域の平均的な土壌水分量の情報は、実際には利用できないので、土壌水分量と密接な関係がある流量の対数値に比例すると仮定する。すなわち、

$$e_T / R_n = \phi = b_T, (q > q_{cr} \text{ and } H < H_{cr}) \quad (2a)$$

$$e_T / R_n = \phi = b_T \exp \left\{ -\gamma_q \ln(q_{cr} / q) - \gamma_\Delta (H - H_{cr}) \right\} \quad (q < q_{cr} \text{ and } H > H_{cr}) \quad (2b)$$

ここに、 R_n : 日純放射量 (水深換算値)、 q : 流出量、 q_{cr} :

土壌水分不足による蒸散抑制が始まる日平均流出量、 H : 日平均飽差、 H_{cr} : 蒸散抑制が始まる飽差、 γ_q, γ_Δ : 蒸散抑制係数、 b_T : 蒸散抑制が働いていないときの蒸散係数、 ϕ : 蒸散係数である。式(2)は、日射量がある無降雨日に適用されるものであるが、降雨がある日でも、にわか雨程度で降雨終了後、日射量があり、光合成が始まることが十分起こりえることから、日降雨量が特定値 T_c 以下のときに式(2)を適用することにし、この特定値 T_c も蒸散モデルに関するパラメータとして追加する。蒸散抑制が始まる飽差 H_{cr} については、服部ら³⁾ の研究成果を参考にして $H_{cr} = 10$ hPa とする。結局、後述の年間流域水収支計算から同定する必要がある蒸散関係パラメータは $b_T, q_{cr}, \gamma_q, \gamma_\Delta, T_c$ の 5 つである。

3. 地表面流分離・長期流出解析モデルの必要性和採用した地表面流分離タンクモデルの概要

(1) 地表面流分離・長期流出解析モデルの必要性

森林流域に降った降雨量から遮断蒸発量を差し引いた地表面到達雨量は、降り始めからの積算降雨量が少ない内は、殆どが、浸透能が大きい多孔質な表層土壌内に浸透する。ところが、表層下部の土層は浸透能が小さいため、降雨強度がその浸透能を上回り、表層とその下層との境界において飽和側方流、すなわち、早い中間流が発生する。Darcy 則を仮定すれば、斜面単位幅当たりの中間流最大流出量 q_{max} は次式で与えられる。

$$q_{max} = k \gamma D \sin(\theta_s) \quad (3)$$

ここに、 k : 表層土壌の透水係数、 γD : 表層の有効透水層厚、 θ_s : 斜面傾斜角、である。一方、上空から降雨強度（厳密には地表面到達雨量） r の雨水が斜面長 L の表層に流入するから、この雨水の流入量と斜面表層の下流端からの流出量が等しい定常状態を考えれば、(表層の透水係数に比べ、表層下部の層の透水係数は、十分小さいとして)、次式が得られる。

$$r = k \gamma D \sin(\theta_s) / L \quad (4)$$

この式は、中間流出の最大強度 r_a を与える式であるが、 r_a のオーダーを調べるため、 $k = 1000 \text{ mm/h}, \gamma D = 100 \text{ mm}, \sin(\theta_s) = 0.5, L = 50 \text{ m}$ を代入すると、 $r_a = 1 \text{ mm/h}$ である。このことから明らかなように、たとえ、表層透水係数 k が大きくとも表層厚 γD の斜面長

L に対する比の値が小さいため、洪水処理計画の対象とするような数 10mm/h もの強い降雨強度が発生する場合には、斜面表層内の中間流出最大強度 r_d を大幅に上回ることになり、地表面流が発生することが容易に推測される。この地表面流は、表層土壌内が雨水で飽和し溢れ出た水であるから、流域地中保水量や森林土壌の保水量に含めることは妥当でない。

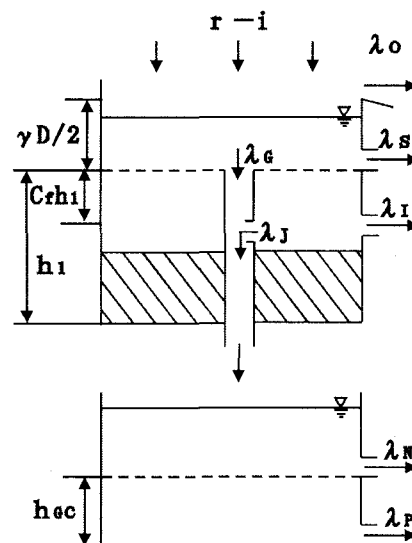
したがって、本論文の主題である、森林土壌や流域の地中保水量を正確に定量評価するためには、降雨から遮断蒸発分を差し引いた地表面到達雨量を算定するとともに、地表面下に浸透できずに地表面上を流れざるを得ない地表面流と、地表面下の流れである地中流（中間流＋地下水流）とに厳密に分離する必要があると考える。

もう一つの重要な視点は、洪水解析の短期水収支と低水解析の年間水収支の整合性が取れていることに配慮することであると考えられる。従来、洪水解析は、地下水流出成分を除く直接流出を対象とし、直接流出に対応する降雨分を有効降雨、それ以外は損失雨量として取り扱うことが多いが、この洪水解析の対象外となった損失雨量は、本来、主として蒸発散量と地下水補給量の和であるはずであり、地下水流出も含めた長期低水解析の年間水収支との整合性が取れている必要がある。一方、洪水処理計画では、流出解析対象の計画降雨に対する初期条件として、先行降雨が計画基本高水に影響する。例えば、渇水が続いた場合か、長雨が続いた場合では、同じ計画降雨でもピーク流量にかなりの違いが出てくる。こうした計画基本高水解析における先行降雨問題は、遮断蒸発、蒸散を分離考慮した長期低水解析の結果を利用すれば、自ずと解決される。

このようなことより、本論文の主題に適した流出解析モデルとしては、長期水収支を満足する、地下水を含めた低水解析が可能であり、洪水流出の地表面流出と地中水流出（中間流出＋地下水流出）を分離できるモデルでなければならないと考える。

（２）採用した地表面流分離モデルの概要

端野ら⁴⁾は、土壌水分の日周期も考慮し、かつ地表面流を Kinematic Wave 式で表現した直列２段タンクモデルを既に開発しているが、ここではその土壌水分部を簡略化し、全体のパラメータ数を少なくした、図－１に示すような地表面流分離直列２段タンクモデルを採用する。このタンクモデルは、表層土壌層を表現する一つの表層タンクと地下水層を表現する一つの地下水タンクからなる。



図－１ 地表面流分離直列２段タンクモデル

a) 表層タンクの構造

表層タンクは、大孔隙に富み透水係数の大きな、早い中間流の発生場である表層（A層）を表現する表層上部タンクと、透水係数が小さく主として土壌水分の保持と遅い中間流の発生場である表層下部（B層、C層）から構成される。地表面流については、飽和地表面流のみを考え、Kinematic Wave 理論に従うと仮定し定式化されている。なお、変動部分流出域（variable partial source area）の概念^{5) 6)}に従い、表面流発生場所は斜面全域ではなく、表面流出高に応じて増減するものとしている。

土壌水分については、本来、植生の蒸散活動に対応した日周期を示すが、本モデルでは、パラメータ節約のため日周期特性を無くし、日蒸散量に見合う量は、1日24時間均等に時間配分させることとし、土壌水分部に水分が無くなれば、地下水タンクから蒸散量を差し引くことにする。

b) 地下水タンクの構造

森林流域には、深層地下水に相当する被圧型地下水と浅層地下水に相当する不被圧型地下水の両方が存在すると考え、被圧型と不被圧型の地下水流出高と地下水貯留高の関係式⁷⁾を用いる。また、被圧型地下水タンクは不被圧型地下水タンクの下部に位置するとし、図のように両者を一つの地下水タンクに統合している。こうすることにより、解析初期条件の地下水タンク初期貯留高を、一つ削減できる。

表層タンクのパラメータは、 λ_o , λ_s , f , C_f , λ_g , λ_l , λ_j , γD , h_1 の9つであり、地下水タンクのパラメータは、 λ_N , λ_p , q_{GC} の3つである。 λ_o , λ_s , λ_g , λ_l , λ_j , λ_N , λ_p はそれぞれ流出孔の大きさ、 f は土壌水分が圃容水量のときの浸透強度、 C_f は土壌水分の飽

和度, γD は有効表層厚, h_1 は土壌水分飽和容量, q_{GC} は不被圧地下水成分が無くなる限界の流出高で, それに対応する地下水タンク貯留高さ h_{GC} とは $h_{GC} = q_{GC} / \lambda_p$ の関係がある。

4. 遮断・蒸散及び表面流分離タンクモデルのパラメータ同定

(1) モデルパラメータの同定法

a) 遮断・蒸散モデルのパラメータ同定法

1年365日の解析期間の開始日と終了日とを, ともに晴天が数日以上続いて流量がほぼ同じとなるような日に設定すると, この1年間の降水量 P と流量 Q の差 ($P-Q$) は, この1年間の遮断蒸発量 I と蒸散量 T の和 ($I+T$) に等しいはずである。したがって, 降水日は, その日の気象・降水量を式(1)に代入し日遮断蒸発量を計算し, 無降水日または, 降水量が蒸散限界降水量 T_c 以下の日は, その日の気象及び観測日流量データを式(2)に代入して日蒸散量を計算する。それらの計算された日単位の遮断蒸発量と蒸散量を年間について集計し, 年間についての観測値 ($P-Q$) と推定値 ($I+T$) の差の絶対値 $|(P-Q)-(I+T)|$ を最小にする最適パラメータセットをシンプレックス法で探索する。

この方法では探索に観測流量を用いると解析開始日と終了日の流量が完全に一致しない(流域貯留高の差 ΔS が現れる)ので支障が出る。そこでまず観測流量から遮断・蒸散パラメータの概略値を定めて地表到達雨量を算出する。次にそれを後述の表面流分離タンクモデルに適用して, 年間水収支が合うように修正して得た計算流量をフィードバックして遮断・蒸散パラメータを同定する。

b) 表面流分離タンクモデルのパラメータ同定法

洪水時の時間流量ハイドログラフと年間日流量ハイドログラフの両者の再現性を高めるために, 基本計算単位時間としては, 1時間を採用する。洪水時には, 流量の大きさに応じて, さらに短い計算単位時間を用いる。したがって, 1年間の日降水・流量データを, それぞれ24時間で除し, 時間降水量, 時間流量データを作成する。年間の主な洪水期間の時間降水・流量については, 観測時間降水量・観測時間流量データで置き換える。表面流分離タンクへの降水量は, 前述の遮断蒸発モデルから推定された遮断量を差し引いたものを用いる。式(2)による蒸散量には気象情報以外に日流量の情報も必要であるが, タンクモデルのパラメータ同定には観測流量を用いることにする。表層タンクの土壌水分部の水が無くなれば, 地下水タンクから, 蒸散量を差し引く。誤差評価関数と

しては, 推定時間流量と観測時間流量の差のカイ2乗基準⁸⁾に年間水収支(降水量, 推定遮断蒸発量, 推定蒸散量, 推定流量及び推定年間貯留差)の誤差絶対値を追加する。この誤差評価関数を最小にする最適パラメータセットをシンプレックス法で探索する。

(2) 解析対象とした森林試験流域に対するパラメータ同定結果

解析対象流域は, 徳島県山川町奥野井試験流域(E135° 13', N34° 01')で高越山(1122m)の南麓に位置し流域平均勾配が約1/4の急峻な山地森林流域である。流域面積は8.0km², 流域平均標高は763mであり, 主要な樹種は針葉樹(スギ)である。地質は三波川結晶片岩帯に属し, 主として緑色片岩, 砂質片岩, あるいはこれらの互層からなる。降水量観測点は4カ所あり, その内の1カ所の観測タワー(標高250m)で気温, 湿度, 日照時間, 風速, 純放射量等の気象観測がなされている。流量は, 水位観測用の刃型堰を設置し, 模型実験で得た水位一流量曲線を介して, 水位より流量に変換されている。

遮断, 蒸散及び流出タンクモデルの同定されたパラメータ値を, 表-1, 2及び3にまとめる。1年間の日流量ハイドログラフの再現性と日遮断量, 蒸散量を図-2に示すが, 洪水時期ともハイドログラフの再現性は良好であると言える。ちなみに, 同定期間(1年)における時間単位流量の相対誤差は27%, 絶対誤差は0.23mm/hである。

表-1 遮断モデルパラメータ

Fixed	$a_g = 0.0207, a_H = 0.156, b_p = -0.220$
Identified	$C = 0.278, P_c = 72.6$

表-2 蒸散モデルパラメータ

Fixed	$H_{cr} = 10.0$
Identified	$b_T = 0.533, \gamma_q = 0.094, q_{cr} = 0.489$ $\gamma_\Delta = 0.819, T_c = 5.72$

表-3 表面流分離タンクモデルパラメータ

Symbol	Identified	Symbol	Identified
λ_o	4.83×10^{-6}	λ_j	2.35×10^{-3}
λ_s	2.78×10^{-3}	γD	8.64×10^1
f_*	4.73×10^0	h_1	2.80×10^1
C_f	3.76×10^{-1}	λ_N	2.05×10^{-2}
λ_G	5.16×10^{-3}	λ_p	6.73×10^{-2}
λ_l	4.14×10^{-4}	q_{GC}	3.47×10^{-2}

分離された年間水収支の内訳を表-4に示す。表-4によれば, この年の年降水量 $P=1683\text{mm}$ の内, 47%が蒸発散量 ($I+T$), 51%が流出量 (Q_o+Q_G), 2%が残留

表-4 1年間(2000. 10. 05 - 2001. 10. 04)水収支の内訳

	P	I	T	Q_o	Q_G	ΔS
Amount (mm)	1683	381	406	257	605	34
Percentage of P	100	23	24	15	36	2

表-5 洪水期間水収支の内訳と降雨、流量、貯留高の最大値

Type of storm	P (mm)	I (mm)	Q_o (mm)	Q_G (mm)	S_{max} (mm)	R_p (mm/h)	Q_p (mm/h)
Long duration type (2000.9.08-9.19)	340.8 (100)	62.2 (18)	133.2 (39)	39.4 (12)	112.4	21.1	2.08
Torrential intensity type (2001.8.20-8.25)	399.2 (100)	71.4 (18)	207.9 (52)	21.1 (5)	97.8	61.7	13.84

貯留量 ΔS である。さらに、蒸発散量は遮断量 I ，23%，蒸散量 T ，24%に分けられ、流出量は表面流出 Q_o ，14%，地中水流出 Q_G ，36%に分けられる。

5. 長雨型と集中豪雨型洪水に対する表面流出量と流域地中保水量の分離

総降雨量 P が341～399mmで、一方は、長雨型(2000. 9.08-9.19; 341mm)，他方は、集中豪雨型(2001. 8.20-8.25; 399mm，8月21日24時間雨量391mm)のときの遮断量 I ，表面流出量 Q_o ，地中水流出量 Q_G と、降雨量 P に対するそれらの百分率を表-5に示す。また、期間中の流域地中保水量，降雨強度及び流出高の最大値： S_{max} ， R_p ， Q_p も表中に記す。表-5によれば、降雨量 P に対する表面流出量 Q_o の割合は、集中豪雨型(52%)は、長雨型(39%)に比べ増加し、反対に流域地中保水量の最大値 S_{max} は、集中豪雨型(97.8mm)は、長雨型(112.4mm)に比べ減少する。勿論、洪水ピーク流出係数 Q_p/R_p は、集中豪雨型(0.224)は、長雨型(0.099)に比べて大きく、表面流出量 Q_o の増大と符合している。また、遮断量 I が、長雨

型、集中型に関わらず降雨量の18%に及んでいることに注目すべきである。

ちなみに、それぞれの洪水期間の始まりから、遮断・蒸散量，表面流出量及び地中水流出量の積算量の時間変化を図-3に示す。この図より明らかなように、洪水処理計画の対象となる集中豪雨型降雨の場合、流域地中保水量は、降水開始とともに急激に上昇し、約100mm程度の限界値に達すると、それ以上に増加できない。したがって、その後の地表到達雨量(＝降雨量－遮断蒸発量)のほとんどは表層から溢れた地表面流出となり、ピーク流量付近の洪水貯留・調節では“緑のダム”に期待できないと考える。すなわち、日雨量が100mm程度であれば、森林の“保水力”は十分発揮されるが、日雨量が300mm以上に及ぶ計画規模の洪水、特にピーク流量付近では、森林の“保水力”には期待できないことに注意が必要である。

一方、集中豪雨でも積算降雨量の10数%が地上に達せず遮断蒸発する訳であるから、遮断蒸発量が洪水ピーク流量の低減に大きく寄与していることが図-3から容易に推測される。ところが、この遮断蒸発量は樹冠の枝

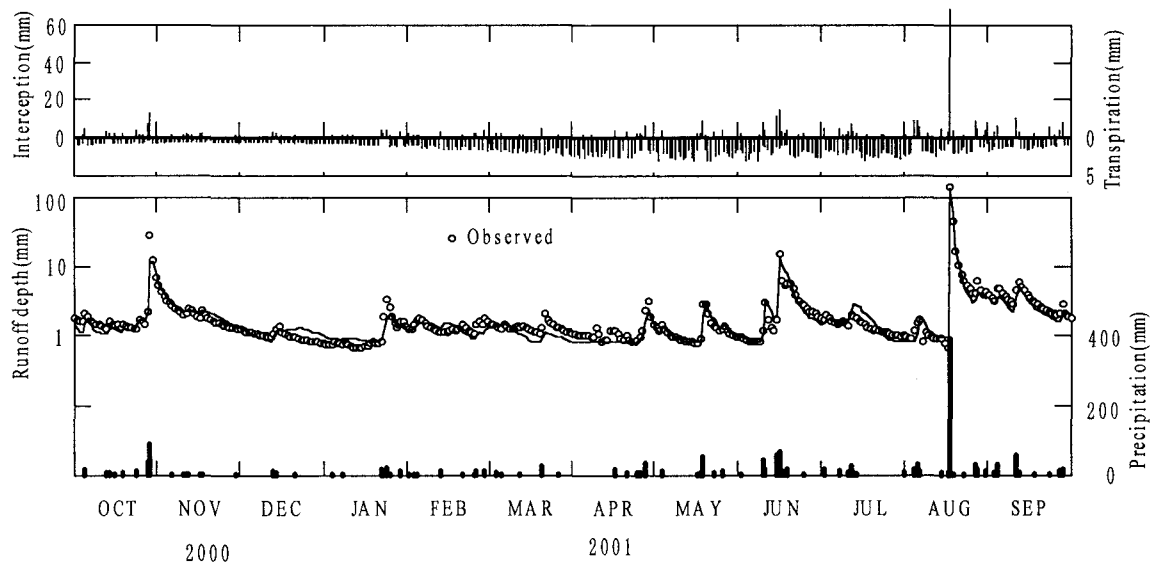


図-2 年間のハイドログラフの再現性と日遮断、蒸散量

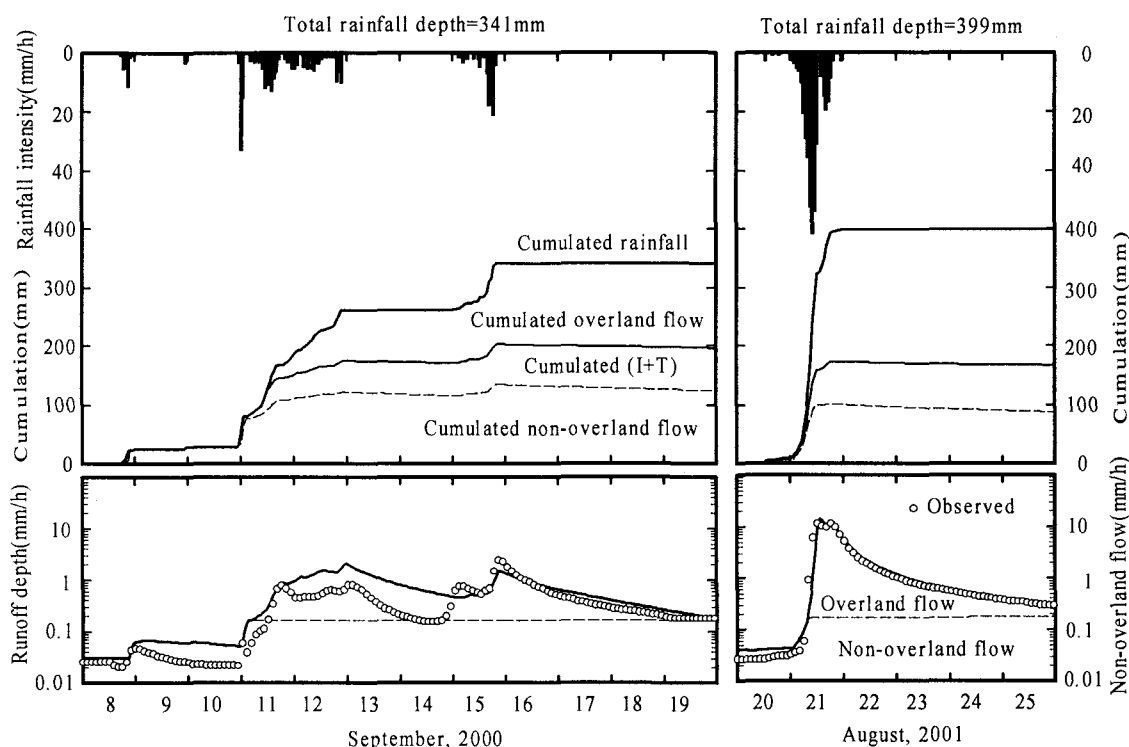


図-3 洪水期間の遮断量、地表面流及び地中水流の積算量

葉面積と密接な関係があり、枝打ち、間伐、伐採等の森林整備をすると遮断蒸発量は減少するため⁹⁾、洪水ピーク低減機能も低下することも忘れてはならない。

6. まとめ

本論文では、1年間の日単位降水量、流量及び気象データと主な洪水の時間降水・流量データを用い、年間水収支に配慮した、遮断・蒸散モデルと表面流分離直列2段タンクモデルのパラメータ同定法を提案した。この方法を一つの森林試験流域に適用し、遮断量、蒸散量、表面流出量、地中水流出量等の年間水収支の内訳を示すとともに洪水時の流域地中保水量の限界(約100mm)を明らかにした。特に、24時間に391mmもの降雨量が集中した豪雨では、ピーク流量が発生した時点で流出量のほとんどが斜面表層から溢れた表面流出であり、いわゆる“緑のダム”の洪水調節能力は期待できない。しかしながら、遮断蒸発は、降雨強度の大小に関わらず、降り始めから常時、積算降雨量の10数%の割合で洪水流出量を低減させることになる。したがって森林流域の洪水解析では、浸透量と分離して、遮断蒸発量を的確に評価する必要がある。

謝辞 貴重な観測資料の提供を頂いた国交省四国地方整備局徳島河川国道事務所の関係各位に心よりお礼申し上げますとともに、観測資料の整理等でご協力頂きました徳島大学工学部建設工学科 梅岡秀博技官に感謝致します。

参考文献

- 1) M. Hashino, H.Yao and H.Yoshida: Studies and evaluation on interception process during rainfall based on a tank model, J. Hydrology, Vol.255, pp.1-11, 2002.
- 2) 元山知範・端野道夫・梅岡秀博: 樹冠遮断現象に関する気象要素について, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, 2003 (CD-ROM).
- 3) 服部重昭・玉井幸治・阿部敏夫: ヒノキ林における土壌水分と飽差が蒸発散に及ぼす影響, 日林誌, Vol.75, No.3, pp.216-224, 1993.
- 4) 端野道夫・吉田 弘・市原秀樹: 降雨遮断およびSPACを考慮したタンクモデルによる長期流出解析, 水工学論文集, Vol.35, pp.93-98, 1991.
- 5) 金丸昭治・高棹琢馬: 水文学, 朝倉土木工学講座4, 朝倉書店, 1975.
- 6) Kirkby, M.J.: Hillslope Hydrology, John Wiley and Sons, 1978.
- 7) 高木不折: 地下水流出のモデル化について, 1977年度水工学に関する夏期研修会講義集, Aコース, 土木学会水理委員会, pp.A-6-1-A-6-23, 1977.
- 8) 永井明博・角屋 睦: タンクモデルの最適同定法に関する基礎的検討, 京大防災研究所年報, Vol.23, B-2, 1980.
- 9) 端野道夫: 森林の水循環と水源かん養機能, 1997年度水工学に関する夏期研修会講義集, 土木学会水理委員会, pp.A-3-1-A-3-20, 1997.

(2003.9.30 受付)