

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

Long-term Runoff Analysis by Tank Model Incorporated
with Rainfall Interception and SPAC

端野 道夫*・吉田 弘**・市原 秀樹***

By Michio Hashino, Hiromu Yoshida and Hideki Ichihara

Long-term runoff analysis by a tank model incorporated with rainfall interception and SPAC (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) is performed using observations of rainfall interception and daily atmospheric temperature besides rainfall and runoff. Parameters representing evaporation rates by rainfall interception and from ground water runoff and the transpiration rate of soil moisture through vegetation are identified by minimizing the square sum of residuals of runoff discharge.

keywords: long-term runoff analysis, tank model, rainfall interception, SPAC

1. はじめに

森林流域における水収支および水循環を定量的に評価しうる流出モデルを開発することは、水資源の開発・管理の上でも、また、森林のもつ理水機能を評価する上でも重要な課題である。しかしながら、森林地における雨水移動機構は複雑であり、水循環を構成する各成分を定量的に評価しうる流出モデルを開発することは容易ではない。たとえば、蒸散量は、蒸散抑制作用にみられるように、気象条件だけではなく、土壌水分にも大きく影響されるため、その推定に際しては、土壌水分を考慮しなくてはならない。これは、とりもなおさず、森林流域における水収支を把握するためには、土壌、植生、大気の3つの場における水循環を考慮しなくてはならないことを示している。

本研究では、大気・植生・土壌を一つの連続体 (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) として捉え、その連続体における水循環の個々の現象を総合化し、モデル化した流出モデルの開発を目的として、降雨遮断タンクモデルと土壌水分構造をもつ直列2段タンクモデルからなる流出モデルを構築し、実森林流域における適用性について検討する。

2. 降雨遮断とSPACを考慮したタンクモデルの構造

樹冠による降雨遮断量を評価するための降雨遮断タンクモデル¹⁾の概要について説明した後、このモデル

- | | | | | | |
|-----|-----|----|--------------|----------|---------------------|
| * | 正会員 | 工博 | 徳島大学教授 | 工学部建設工学科 | (〒770 徳島市南常島三島町2-1) |
| ** | 正会員 | 工修 | 徳島大学助手 | 工学部建設工学科 | (同上) |
| *** | 学生員 | | 徳島大学大学院工学研究科 | | (同上) |

により得られた地表到達雨水に対する流出量を計算する、SPACを考慮した直列2段タンクモデルについて説明する。

2. 1 降雨遮断モデルの概要¹⁾

樹冠を一つのタンクとすると、水収支式は次のように表される。

$$dS/dt = r - E_s - d - q \quad (1)$$

ここに、 S : 樹冠付着水分高(mm), r : 降雨強度(mm/hr), E_s : 樹冠面からの付着水の蒸発強度(mm/hr), d : 樹冠面からの付着水の雨滴落下強度(mm/hr), q : 樹冠付着水の樹幹流下強度(mm/hr)。

雨滴落下強度 d , 樹幹流下強度 q については、次式のように貯留高 S の関数とし、降雨時と無降雨時とではパラメータ値が異なるとする。

$$d = D / \{ (1 - \alpha) A \} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq h_{d1}, r > 0; 0 \leq S \leq h_{d2}, r = 0) \\ \lambda_{d1} (S - h_{d1}) & (h_{d1} < S, r > 0) \\ \lambda_{d2} (S - h_{d2})^2 & (h_{d2} < S, r = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$q = Q / \{ (1 - \alpha) A \} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq h_{s1}, r > 0; 0 \leq S \leq h_{s2}, r = 0) \\ \lambda_{s1} (S - h_{s1}) & (h_{s1} < S, r > 0) \\ \lambda_{s2} (S - h_{s2})^2 & (h_{s2} < S, r = 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 A : 樹木の枝葉の及ぶ基準とする面積, α : 基準面積 A に降った降雨分のうち、枝葉にまったくふれずに樹間を通過する直達降雨の割合, Q : 樹幹流下量, D : 枝葉からの雨滴落下量。

樹冠面からの付着水の蒸発強度 E_s については、ハモン式による可能日蒸発散量の時間平均値 E_{h24} に比例すると仮定する。

$$E_s = K_1 \cdot E_{h24} \quad (K_1 : \text{降雨遮断による蒸発係数}) \quad (4)$$

したがって、地表への全到達降雨量 r_s は、次式で表されることになる。

$$r_s = \alpha \cdot r + (1 - \alpha) \cdot (d + q) \quad (5)$$

2. 2 SPACを考慮した直列2段タンクモデル

直列2段タンクモデルは、図-1のように、1つの表層タンクと1つの地下水タンクからなる。

(a) 表層タンクの構造

表層タンクは、kinematic wave 理論に符合するような流出機構を表現する上部タンクと、土壤水分構造を持つ下部タンクとから構成される。

上部タンクの構造： 中間流出高 q_s 、地下水補給量 f_c はいずれも、Darcy 則に従うとして、表層内貯留高 S_s が表層容量 $\gamma D/2$ 以下のとき、次式が成り立つとする。

$$q_s = \lambda_s \cdot S_s, \quad f_c = \lambda_c \cdot S_s \quad (6)$$

ここに、 γD : 見かけの表層厚, λ_s : 中間流出低減係数, λ_c : 地下水補給係数, $S_s \geq \gamma D/2$ のとき $q_s = r_s$ (中間流出最大強度), $f_c = f_c$ (地下水補給最大強度) とする。

表面流出については、 S_s が $\gamma D/2$ を越えたときに斜面下流端付近から発生しはじめるものとする。表面流発生場は斜面全域でなく、表面流出高に応じて増減するものと考え、kinematic wave 理論を用いて推定

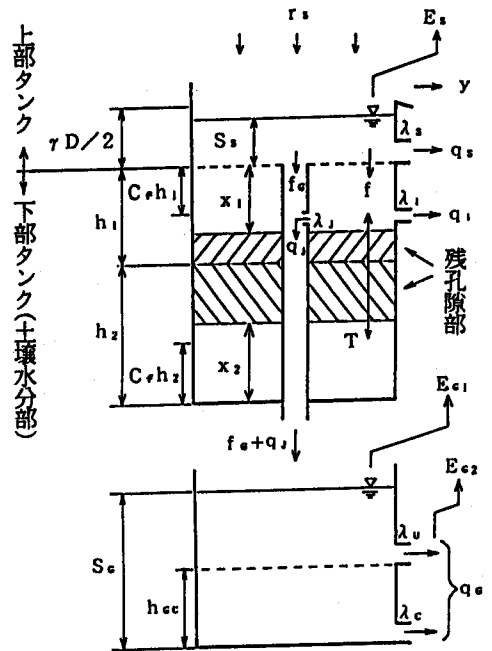


図-1 SPAC を考慮した直列2段タンクモデル

する。このとき、表面流出高 y は次式のように示される²⁾。

$$y = \lambda_0 \cdot S_0^m \quad (7)$$

ここで、 λ_0 ：斜面粗度に関する定数、 S_0 ：表面流貯留高、 $m=3$ （層流則として）

土壌水分部（下部タンク）の構造：土壌水分を考慮するため、図-1に示すような1次、2次の2つの貯留部からなる土壌水分構造を設ける。ここで、1次の貯留部とは蒸発散や浸透降下ならびに2次との水分のやりとりなど、水分移動の比較的速い場であるが、2次の貯留部は1次との水分のやりとり以外には水分移動のない場であると仮定した。なお1次・2次間相互の水分移動量 T は、それぞれの飽和度の差に比例すると考え、次式のように仮定する³⁾。

$$T = K (x_1/h_1 - x_2/h_2) \quad (8)$$

ここに、 K ：土壌水分移動係数、 x_1 ：1次土壌水分貯留高、 h_1 ：1次土壌水分の飽和容量、 x_2 ：2次土壌水分貯留高、 h_2 ：2次土壌水分の飽和容量である。

上部タンクから下部タンクへの浸透量 f については、次式のように仮定する。

$$f = \begin{cases} f_0(1 - x_1/h_1)/(1 - C_r) & (S_s > 0) \\ r_s & (S_s = 0) \end{cases} \quad (9)$$

ここに、 C_r ：圃場容水量の総飽和容量 ($h_1 + h_2$) に対する割合、 f_0 ： $x_1 = C_r h_1$ のときの f の値。

また、遅い中間流出量 q_i および土壌からの地下水補給量 q_j については、次式を仮定する。

$$q_i = \lambda_i (x_1 - C_r \cdot h_1), \quad q_j = \lambda_j (x_1 - C_r \cdot h_1) \quad (x_1 > C_r \cdot h_1) \quad (10)$$

ここに、 λ_i ：遅い中間流出の低減係数、 λ_j ：土壌からの地下水補給量係数。 $x_1 \leq C_r \cdot h_1$ のとき $q_i = q_j = 0$ とする。

表層タンクからの蒸発散量 E_s は、1時間降雨強度 $r = 0$ のとき発生するとし、蒸散抑制作用を考慮して、次式のように仮定する。

$$E_s = \begin{cases} K_2 \cdot E_h \cdot x_1 / x_0 & (x_1 \leq x_0) \\ E_{\max} & (K_2 \cdot E_h \geq E_{\max}) \\ K_2 \cdot E_h & (x_1 \geq x_0 \text{ or } K_2 \cdot E_h \leq E_{\max}) \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 x_0 ：蒸散抑制の臨界土壌水分高、 E_h ：ハモン式による可能日蒸発散量、 $E_{\max}$ ：蒸発散限界値。

K_2 ：表層からの蒸発散係数。上部タンク内に貯留水があるときは上部タンクの貯留水が、上部タンク内貯留水がないときは下部タンクの土壌水分が蒸発散作用によって大気中に還元されるとする。

結局、表層タンクに関する基本式をまとめれば、次のようになる。

(i) $S_s = 0$ のとき

$$dx_1/dt = f - T - q_i - q_j - E_s, \quad dx_2/dt = T \quad (12)$$

(ii) $S_s < \gamma D/2$ のとき

$$\begin{aligned} dS_s/dt &= r_s - q_s - f_0 - f - E_s \\ dx_1/dt &= f - T - q_i - q_j, \quad dx_2/dt = T \end{aligned} \quad (13)$$

(iii) $S_s \geq \gamma D/2$ のとき

$$\begin{aligned} dS_s/dt &= r_s - y - r_a - f_0 - f - E_s \\ dx_1/dt &= f - T - q_i - q_j, \quad dx_2/dt = T \end{aligned} \quad (14)$$

(b) 地下水タンクの構造

山地流域においては、深層地下水に対する被圧型と浅層地下水に対する不被圧型の地下水が存在すると考え、地下水流出高 q_c と地下水タンク貯留高 S_c の関係を次式のようにモデル化する。

$$(i) \quad S_c \leq h_{cc} \text{ のとき} \quad q_c = \lambda_c \cdot S_c \quad (15)$$

$$(ii) \quad S_c > h_{cc} \text{ のとき} \quad q_c = \lambda_u^2 \cdot (S_c - h_{cc})^2 + \lambda_c \cdot S_c \quad (16)$$

ここに、 λ_c ：被圧地下水低減係数、 λ_u ：不被圧地下水低減係数、 h_{cc} ：不被圧地下水流出の限界貯留高

地下水低減係数には季節変化がみられることが報告されているが、その原因の一つは溪岸付近の植生による地下水の吸い上げであり、一つは地下水流出の滲み出しによる蒸発であると考えられている⁴⁾。そこで地下水タンクからも蒸発散があるものと考え、溪岸植生による蒸散量 E_{c1} 、滲み出しによる蒸発量 E_{c2} を次式のように仮定する。

$$E_{c1} = K_3 \cdot E_h, \quad E_{c2} = (K_4 + K_5 \cdot q_c) E_h \quad (17)$$

ここで、 K_3 : 溪岸植生の蒸散係数、 K_4 、 K_5 : 滲み出しによる蒸発係数。したがって、地下水タンクに関する水収支式は次式ようになる。

$$dS_c/dt = (f_c + q_1) - q_c - E_{c1} - E_{c2} \quad (18)$$

3. 筑波森林試験地へのモデルの適用結果と考察

3. 1 適用試験流域の概要

本試験流域(図-2)は国立環境研究所筑波森林試験地⁵⁾で、流域面積は67.5ha、標高200~380m、平均斜面勾配 $\theta = 15^\circ$ である。地質は表層付近に関東ローム質粘土を主体とした崖錐が分布しており、それに深には泥岩を中心とする堆積岩と、風化した花崗岩が分布し、GL-10m付近に基岩の花崗岩が存在している。植生は流域の85%がスギ、ヒノキ、アカマツである。雨量は転倒マス式自記雨量計で、流出量はフロート式自記水位計で計測されている。気温については当試験地では計測されておらず、気象庁柿岡地磁気観測所で得られたデータを用いる。今回、解析に用いた期間は1987年6月1日から11月15日までの約6カ月間である。

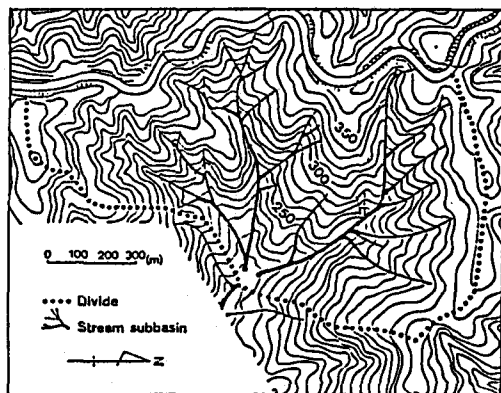


図-2 筑波試験流域

表-1 パラメータの一覧表と同定値

記号	記号の説明	同定値
λ_e	早い中間流出低減係数	0.004 (hr ⁻¹)
λ_c	地下水補給低減係数	0.016 (hr ⁻¹)
C_r	圃場容水量	0.65
f_0	$x_1/h_1 = C_r$ のときの f の値	1.9 (mm/hr)
C_{rini}	圃場容水量初期値	0.65
h_1	1次土壌水分飽和容量	459.8 (mm)
h_2	2次土壌水分飽和容量	4112.2 (mm)
K_1	降雨遮断による蒸発係数	0.500
K_2	表層からの蒸発散係数	0.691
K_3	溪岸植生による蒸散係数	0.000
K_4	溪岸での滲み出しによる蒸発係数	0.000
K_5	同上	0.000
E_{max}	限界蒸散強度値	0.199 (mm/hr)
λ_l	遅い中間流出低減係数	0.0012 (hr ⁻¹)
λ_1	土壌水分からの地下水補給低減係数	0.00001 (hr ⁻¹)
x_0	蒸散抑制の限界土壌水分高	294.3 (mm)
λ_c	被圧地下水低減係数	0.0005 (hr ⁻¹)
λ_u	不被圧地下水低減係数	0.0021 (hr ⁻¹)
h_{cc}	被圧地下水流出の限界貯留高	34.94 (mm)
γD	見かけの表層厚	110.3 (mm)
λ_o	斜面粗度に関する定数	

3. 2 パラメータとその同定方法

本流出モデルの同定すべきパラメータは λ_o , λ_s , λ_c , λ_l , λ_1 , λ_u , λ_c , γD , C_r , C_{rini} , f_0 , h_1 , h_2 , x_0 , E_{max} , K_1 , K_2 , K_3 , K_4 , K_5 の計21個であり、降雨量データと流出量データから同定を行う。表-1にそのパラメータの一覧表を示す。降雨遮断モデル関係の9個のパラメータについては降雨量データと樹幹下流量データから別途、同定したものの平均値を用いる。

降雨遮断モデルによる地表到達雨量の計算単位時間は1時間とした。直列2段タンクモデルによる流出計算では、1日毎に降雨量の有無を調べ、降雨がある日には計算単位時間を1時間とし、その日の午前0時より1時間毎の流出

量を計算する。一方、降雨の無い日でかつ、午前0時の時点で表面・中間流出がないときには計算単位時間は1日、それ以外のときは1時間とする。

可能蒸発散量 E_p (mm/hr) については、計算単位時間が1日のときはハモン式による可能日蒸発散量を平均時間強度に変換し、計算単位時間が1時間のときは正弦曲線で日中に配分する。

同定に際しては、小谷⁸⁾が開発した非線形最小二乗法のプログラム "SIMPLEX" を用いる。そして、評価基準として角屋の提案している χ^2 基準⁷⁾ : $F = (\sum |q - q_c| / \sqrt{q}) / N$ (mm/hr単位) を採用する。

3. 3 筑波森林試験地へのモデルの適用結果と考察

本流出モデルの適用によって得られたハイドログラフを図-3に示す。ハイドログラフの再現性は全般的に良好であること、また、総流出量の相対誤差は約 2.3 % であることから、本流出モデルの基本的な構造に問題はないといえる。しかし、中間流出の発生する降雨前後においては若干再現性がよくなく、また、土壤水分飽和度についても森林植生活動の活発な夏期において減少していないのは通説と一致していない。⁸⁾ これは、樹木の降雨遮断による蒸発量、すなわち、樹木に付着した降雨の蒸発量が若干過少であるためと思われ、今後パラメータ同定法について検討する余地がある。

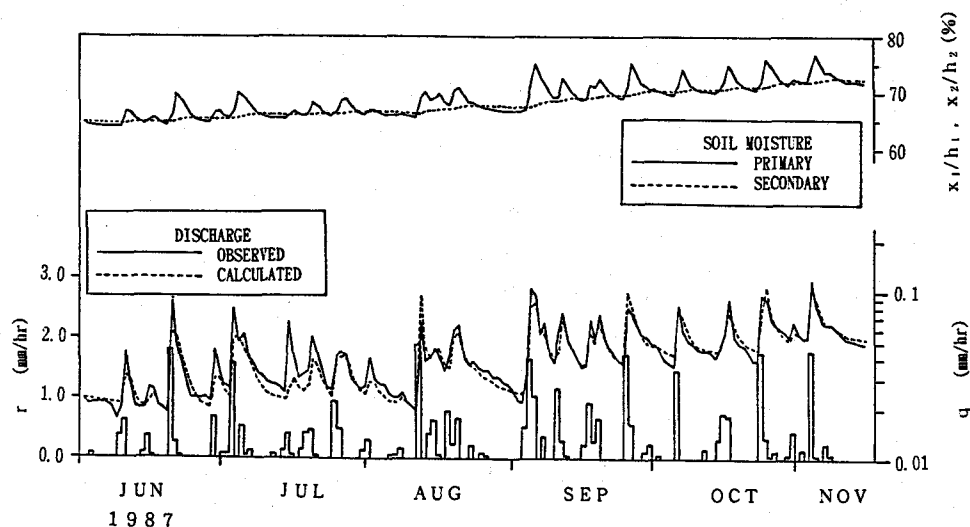


図-3 ハイドログラフの適合度

同定されたパラメータ値を表-1に示す。2次土壤水分飽和容量 h_2 が 4000 mm と大きくなっている。当試験地は前述のように表層付近に関東ローム質粘土を主体とした崖錐が分布しており、それ以深には泥岩を中心とする堆積岩と、風化した花崗岩が地表面下10m付近まで分布していることを考えれば、妥当な値であろう。なお、表面流出成分は本モデルでの同定では検出されなかったため、そのパラメータ同定は不可能であった。

解析期間の総降雨量、総流出量のほか、本モデルにより得られた推定総流出量、降雨遮断量、地表への総到達雨量、土壤水分の増加量、表層タンクからの蒸発散量、地下水タンクからの蒸発量と蒸散量を表-2に示す。これを見ると、総降雨量約 800 mm のうち、約 175 mm の雨水が流出量となる。このうち、早い中間流出量は約10mm、遅い中間流出量は約 90 mm であり、残りの 75 mm が地下水流出量となる。一方、蒸発散により大気中へ還元されるのは、約 300 mm で、そのうち、降雨遮断による蒸発量は約 60 mm である。地下水タンクからの蒸発および蒸散は見られず、残りの約 240 mm は主として、根系からの吸い上げによる土壤水分の蒸散量と思われる。残りの降水は土壤水分となり、その結果、6月始めに比べ11月中旬では土壤水分飽和度は約 10 %, 絶対値にして約 330 mm 増加したことになる。

4. まとめ

本研究は、森林流域における水循環の各成分を定量的に評価する流出モデルを開発することを目的として降雨遮断モデルとSPACを考慮した直列2段タンクモデルからなる流出モデルを構築し、実山地森林流域に対する適用性について調べたものである。

本流出モデルのハイドログラフの再現性は全般的に良好で、本流出モデルの基本的構造については問題はないと思われる。しかし、降雨遮断による降雨中の蒸発量を考慮していないために、夏季における森林植生による土壌水分の減少が再現できていないと思われる。今後、別途開発中である蒸散モデル⁹⁾や、改良された降雨遮断モデル¹⁰⁾を、SPACを考慮した直列2段タンクモデルに用いれば、水循環の各成分の定量的評価をより精度の高いものにすることができるであろう。また、こうした流域規模のトータルシステムとしての解析により逆にサブシステム、ミクロモデルとしての降雨遮断モデル、蒸散モデル、土壌水分モデルを検証することができると考えている。

最後に、本研究は日本生命財団（代表：大阪大学 村岡浩爾教授）の援助を受けて行われた研究成果の一部であり、深く感謝の意を表します。また、貴重なデータを提供していただきました国立環境研究所および気象庁柿岡地磁気観測所に対し、謝意を表します。

参考文献；

- 1) 端野道夫・吉田 弘・高橋将人：降雨遮断タンクモデルの比較検討，水文・水資源学会研究発表会要旨集，pp.13-16, 1989.
- 2) 端野道夫：山地小試験流域の降雨流出解析，水理講演会論文集，Vol. 26，pp.183-189, 1982
- 3) 菅原・渡辺・尾崎・勝山：タンクモデルに付加された土壌水分構造の性質，国立防災科学技術センター研究報告，第27号，pp.193-206, 1982.
- 4) 塚本良則：森林と地下水，地学雑誌，Vol. 98-2，pp.13-24, 1989.
- 5) 村岡浩爾・平田健正：渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究，国立環境研究所研究報告，第95号，pp.21-35, 1986.
- 6) 小谷恒之：非線形多変数関数の極小化，大阪大学大型計算機センターニュース，No. 32，pp.27-48, 1979.
- 7) 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，第23号，B-2, 1980
- 8) 中野秀章：森林水文学，水文学講座13，共立出版，1976.
- 9) 端野道夫・吉田 弘・中谷達志：実森林樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討，水工学論文集，Vol. 35，1991. (印刷中)
- 10) 端野道夫・吉田 弘：ヒートパルス速度による森林蒸散量推定モデルについて，水工学論文集，Vol. 35，1991. (印刷中)

表-2 解析期間の水収支表

	各 成 分	数値 (mm)
実測 値	総降雨量	806.0
	総流出量	174.7
推定 値	表面流出量	0.0
	早い中間流出量	9.9
	遅い中間流出量	91.6
	地下水流出量	68.6
	流出量小計	170.1
推定 蒸発散	降雨遮断量	58.8
	土壌からの蒸発量	245.3
	地下水からの蒸発量	0.0
	地下水からの蒸散量	0.0
	蒸発散量小計	304.1
	土壌水分の増加分	331.8