樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定法

吉田 弘*・端野道夫*・村岡浩爾**

A method of estimating forest rainfall interception
by tank model based on stem flow data

Hiromu YOSHIDA・Michio HASHINO and Kohji MURAOKA

A mathematical model which represents forest rainfall interception process has been developed in order to estimate forest evaporation apart from transpiration. This model consists of a canopy tank and a stem tank. The evaporation rate due to rainfall interception is supposed to be proportional to the product of potential evapotranspiration calculated by Penman's equation and canopy storage calculated by this model. The parameters of this model are identified by rainfall, stem flow and micrometeorological data; i.e. temperature, humidity, wind speed and radiation.

This model is applied to Shirakawadani Experimental Catchment in Tokushima prefecture. Model parameters for a Sugi (*Cryptomeria japonica*) stand have no seasonal variation, so that the model requires only a set of parameter values through a year. Estimated evaporation by the model agrees with actual evaporation obtained from measurements of rainfall, throughfall and stem flow.

Key words: rainfall interception process, evaporation, tank model, stem flow, canopy storage.

森林流域からの蒸発量を蒸散量とは分離して評価するために、森林の降雨遮断過程を表現するタンクモデルタイプの数理モデルを開発した。本モデルは樹冠部分を表現するタンクと樹幹部分を表現するタンクの2つから構成される。降雨中の蒸発強度はPenman式による値と付着水量との積に比例すると仮定する。モデルは降雨量、樹幹流量ならびに気象(気温、湿度、風速、日射量)のデータセットを揃えることで同定される。本モデルを徳島県白川谷試験地の針葉樹(スギ)データに適用したところパラメータに季節変動は認められなかった。したがって、年間を通して1つのパラメータを用いることが可能である。モデルにより推定された遮断蒸発量は林外雨量、樹幹通過雨量および樹幹流量の実測データから算定された蒸発量とほぼ一致した。

キーワード: 降雨遮断過程, 蒸発量, タンクモデル, 樹幹流量, 樹冠付着水

I. はじめに

水資源の適正な開発、管理ならびに保全を行う上で、河川上流部の水源域において的確に水循環機構を把握し、流域水収支を定量的に評価することが必要不可欠である。そのためには、流域の降雨遮断蒸発量、流域蒸散量を定量評価できることが前提となる。しかしながら、旧来より多くの観測研究がなされてきたにもかかわらず、樹冠の濡れ具合を表現す

る困難さと樹冠付近の複雑な微気象条件等のために、未だもってこれらを定量的に評価し得る方法論は確立されていない。

降雨遮断過程に関する観測研究は1800年代の半ばに遡る。この頃より欧米で各地に森林測候所が設けられ、盛んに林外雨量、樹冠通過雨量などの観測が行われ始めた¹⁾。わが国においても同様な観測が既に大正時代から始まっており²⁾、流出試験地で林外雨量、樹幹通過雨量、樹幹流量の観測を行い、主

*徳島大学工学部 Faculty of Engineering, The University of Tokushima

**大阪大学工学部 Faculty of Engineering, Osaka University

として一降雨に関する総降雨量と遮断量の相関を取るという方法論が取られてきた。こうした長年にわたる蓄積データから多数の成果が上げられており、経験的に両者にはほぼ線形関係の存在すること⁹⁾が明らかとなってきた。

樹種やその他の要因によって若干の違いはあるものの、降雨の遮断蒸発量に降雨中蒸発量が大きな割合を占めることが認識されてきた。しかしながら、降雨中の蒸発量は樹冠の濡れ具合、降雨強度、降雨継続時間、さらには樹冠付近の微気象といった複数因子の影響を強く受けることから、従来の経験的な方法による限り、蒸発過程に影響を及ぼすこうした要因を考慮することは困難であり、正確な推定は不可能である。

降雨中蒸発量が全遮断蒸発量の中で大きな割合を占める理由の一つとして森林としての葉面積（蒸発面）の大きさが指摘されている¹¹⁾。また他方で、降雨中蒸発に関するエネルギー収支について、降雨中での蒸発潜熱が純放射量を上回るという報告⁹⁾がある。塚本ら²²⁾は降雨強度が大きくなれば降雨中蒸発強度もそれにつれて大きくなるという現象を指摘しているが、現状ではこうした現象をうまく説明することはできていない。上記のような問題点を解決するためには、的確に蒸発現象を把握する必要がある。そのためのアプローチとしては、樹冠に捕捉された雨水が流動する過程を、降雨中の蒸発強度を樹冠の濡れ具合、すなわち樹冠付着水量ならびに樹冠付近の微気象と関連させてモデル化する方法が有力と考えられる。しかしながら、その際には樹冠への付着水量を的確に評価できることが前提となる。このような着想に基づいて、例えばRutterら¹⁷⁾がタンクモデルタイプの数値モデルを提案している。しかしながら、彼のモデルではCanopyのタンクとStemのタンクが並列構造となっている上に、一般に降雨中と降雨終了後では変化すると考えられるタンクからの流出形式も全く同じとなっている。わが国においてもRutterらに先がけて武田²¹⁾が同様の試みを行っている。近年では鈴木ら¹⁸⁾も貯留型のモデルを提案しているが、彼らのモデルは降雨量と樹冠通過雨量および樹幹流下量の間を経験的な線形関係を仮定したものであって付着水の動態を的確に表現できているとは言い難い。

以上の経緯に鑑み、本研究では、樹幹ならびに枝葉を含む樹冠に付着した雨水量をそれぞれタンクモデルタイプの数値モデル（以下降雨遮断タンクモデル

と称する）で表現し、林外雨量、樹幹流下量の時間変化データからモデルパラメータを同定し、流域の遮断蒸発量を推定する方法論を提案する。研究はまず室内での降雨遮断実験の結果を用いてモデルの基本構造を検証した上で、実森林データに適用して現地での観測データからモデルによる推定値の妥当性を検討し方法論としての妥当性を検証する、という手順で進められた。

II. 降雨遮断機構のモデリング

1. 降雨遮断タンクモデルの構造

降雨遮断タンクモデル⁵⁾は、Fig. 1(a), (b)のように、森林樹木の樹冠（枝葉）を表すタンク（樹冠タンク）と樹幹（幹）を表すタンク（樹幹タンク）の2つから構成される。降雨にともなう雨滴の衝撃は樹冠の揺れ具合や雨滴が飛沫として飛び散る現象に影響を与えと考えられる。したがって、降雨中と降雨終了後では雨滴の樹冠に対する衝撃効果の有無によって樹冠に付着した雨水の樹幹流下や滴下の形態は変化すると考えられることから、モデルの構造はもちろんのこと、モデルパラメータも樹冠部および樹幹部を水平面に投影したときの樹木の枝葉の及ぶ面積に占める割合（以下射影面積割合と称する）以外は降雨中と降雨終了後では全て値が変化すると仮定している。

(a) 降雨中の流動過程

降雨強度 r の雨が降ったとき、 $P_1 r$ が樹冠タンクに、 $P_2 r$ が樹幹タンクにそれぞれ入る。したがって樹木に触れずに地表へ到達する直達雨量は $(1 - P_1 - P_2)r$ と表される。樹冠タンクの貯留高 S_1 は増加して

Fig. 1 Schematic illustration of rainfall interception model

h_a を越えたとき初めて枝葉からの滴下 $P_1 d_1$ が発生する。さらに h_b を越えると樹幹タンクへの移動 $f P_1 / P_2$ が発生する。一方樹幹タンクの貯留高 S_2 も降雨の開始とともに増加し、 h_c を越えたとき初めて樹幹流下 $P_2 q$ ならびに幹からの滴下 $P_2 d_2$ が発生する。この際樹冠タンクの S_1 と樹幹タンクの S_2 は別個に変動すると仮定している。

(b) 降雨終了後の流動過程

降雨が終了すると、 S_1 は減少し h_{a2} になったとき滴下が終了する。また、 S_2 が h_{c2} になったとき樹幹流下および滴下が終了する。樹冠タンク、樹幹タンクに関する水収支はそれぞれ次式で表現される。

樹冠タンク：

$$\frac{d[P_1 A S_1]}{dt} = P_1 A (r - E) - D_1 - F \quad (1)$$

樹幹タンク：

$$\frac{d[P_2 A S_2]}{dt} = P_2 A (r - E) + F - D_2 - Q \quad (2)$$

樹冠や樹幹からの滴下量 D および樹幹流下量 Q はそれぞれの部分での付着水量に依存すると考えられるから、それぞれのタンクの貯留高 S の関数で表現できよう。その際に雨滴の衝撃が樹冠や樹幹に付着した雨水の流動に対してある種の圧力的な効果を及ぼすと考えれば、地下水流出の形態²⁰⁾に類似して、降雨中は雨滴が圧力効果を及ぼすと考えて流出高が貯留高 S の1次式で表現される被圧地下水型(Darcy型)モデルで、降雨終了後は雨滴の圧力効果が解放されるとして流出高が貯留高 S の2次式で表現される不圧型地下水モデルでそれぞれ次のように表現できる。

降雨中：

$$d_1 = \frac{D_1}{P_1 A} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S_1 \leq h_a) \\ \lambda_a (S_1 - h_a) & (h_a \leq S_1) \end{cases} \quad (3)$$

$$f = \frac{F}{P_1 A} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S_1 \leq h_b) \\ \lambda_b (S_1 - h_b) & (h_b \leq S_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{D_2}{P_2 A} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S_2 \leq h_c) \\ \lambda_c (S_2 - h_c) & (h_c \leq S_2) \end{cases} \quad (5)$$

$$q = \frac{Q}{P_2 A} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S_2 \leq h_c) \\ \lambda_c (S_2 - h_c) & (h_c \leq S_2) \end{cases} \quad (6)$$

降雨終了後：

$$d_1 = \frac{D_1}{P_1 A} = \begin{cases} \lambda_{a2} (S_1 - h_{a2})^2 & (h_{a2} \leq S_1) \\ 0 & (0 \leq S_1 \leq h_{a2}) \end{cases} \quad (7)$$

$$f = \frac{F}{P_1 A} = 0 \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{D_2}{P_2 A} = \begin{cases} \lambda_{c2} (S_2 - h_{c2})^2 & (h_{c2} \leq S_2) \\ 0 & (0 \leq S_2 \leq h_{c2}) \end{cases} \quad (9)$$

$$q = \frac{Q}{P_2 A} = \begin{cases} \lambda_{c2} (S_2 - h_{c2})^2 & (h_{c2} \leq S_2) \\ 0 & (0 \leq S_2 \leq h_{c2}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、

A ：樹木の枝葉の及ぶ面積（規準面積）

P_1 ：樹冠部射影面積の規準面積に占める割合

P_2 ：樹幹部射影面積の規準面積に占める割合

$(1 - P_1 - P_2)$ ：直達雨量の割合

D_1 ：樹冠からの滴下量

D_2 ：樹幹からの滴下量

F ：樹冠タンクから樹幹タンクへ流入する量

Q ：樹幹流下量

r ：降雨強度

E ：蒸発強度

d_1 ：樹冠からの滴下強度

d_2 ：樹幹からの滴下強度

f ：樹冠タンクから樹幹タンクへの流下強度

q ：樹幹流下強度

S_1, S_2 ：樹冠および樹幹の貯留高

h_a, h_{a2} ：滴下開始および終了時の限界貯留高

h_b ：樹冠タンクから樹幹タンクへの流入開始時の限界貯留高

h_c, h_{c2} ：樹幹からの流下ならびに滴下の開始および終了時の限界貯留高

λ_a, λ_{a2} ：樹冠からの滴下量を支配する孔の大きさ

λ_b ：樹冠タンクから樹幹タンクへの流入量を支配する孔の大きさ

λ_c, λ_{c2} ：樹幹流下量を支配する孔の大きさ

λ_d, λ_{d2} ：樹幹からの滴下量を支配する孔の大きさ

である。水深および時間の単位はそれぞれ(mm)および(hour)である。

2. モデルパラメータの同定法

1) 降雨中のパラメータ同定法

式(1), (2)の両辺をそれぞれ $P_1 A$ および $P_2 A$ で除すと次式を得る。

樹冠タンク：

$$\frac{dS_1}{dt} = r - E - d_1 - f \quad (12)$$

樹幹タンク：

$$\frac{dS_2}{dt} = r - E + P_1 / P_2 \cdot f - d_2 - q \quad (13)$$

上記2式を差分化すると次のようである。

樹冠タンク：

$$\frac{S_{1i} - S_{1i-1}}{\Delta t} = r_i - E - \frac{d_{1i} + d_{1i-1}}{2} - \frac{f_i + f_{i-1}}{2} \quad (14)$$

樹幹タンク：

$$\begin{aligned} \frac{S_{2i} - S_{2i-1}}{\Delta t} = r_i - E - \frac{d_{2i} + d_{2i-1}}{2} \\ + \frac{P_1 f_i + f_{i-1}}{2} - \frac{q_i + q_{i-1}}{2} \end{aligned} \quad (15)$$

各タンクの貯留高、滴下量および樹幹流下量は式(14)、(15)をもとに、計算時間間隔 $\Delta t = 1/60$ (hour) で逐次算定される。ただし、タンク内の貯留高 S_1 、 S_2 によって滴下、樹幹流下の生起の仕方が異なるため以下に記すように細かな場合分けが必要となる。なお、計算は無降雨期間後の降雨開始直前より行う。したがってタンク内の初期貯留高はいずれもゼロとしている。以下の式中で E_1 は降雨中蒸発強度、 t_{d1} 、 t_{s1} はそれぞれ滴下、樹幹流下の開始時刻ならびに t_r は降雨終了時刻を表す。

樹冠タンク：

(a) $0 \leq t \leq t_{d1}$ のとき

$$\begin{aligned} d_{1i} &= 0 \\ f_i &= 0 \\ S_{1i} &= (r_i - E_1) \Delta t + S_{1i-1} \end{aligned} \quad (16)$$

(b) $t_{d1} \leq t \leq t_{s1}$ のとき

$$\begin{aligned} d_{1i} &= \lambda_a (S_{1i} - h_a) \\ f_i &= 0 \\ S_{1i} &= \frac{r_i - E_1 + \lambda_a h_a / 2 - d_{1i-1} / 2 + S_{1i-1} / \Delta t}{1 / \Delta t + \lambda_a / 2} \end{aligned} \quad (17)$$

(c) $t_{s1} \leq t \leq t_r$ のとき

この時間帯では、貯留高によって① $S_{1i} < h_a < h_b$ 、② $h_a < S_{1i} < h_b$ 、③ $h_a < h_b < S_{1i}$ の3通りが想定されるが、例えば③の場合について記せば以下のようである。

$$\begin{aligned} d_{1i} &= \lambda_a (S_{1i} - h_a) \\ f_i &= \lambda_a (S_{1i} - h_b) \\ S_{1i} &= \frac{r_i - E_1 + \lambda_a h_a + \lambda_b h_b / 2}{1 / \Delta t + (\lambda_a + \lambda_b) / 2} \\ &+ \frac{S_{1i-1} / \Delta t - (d_{1i-1} + f_{i-1}) / 2}{1 / \Delta t + (\lambda_a + \lambda_b) / 2} \end{aligned} \quad (18)$$

樹幹タンク：

(a) $0 \leq t \leq t_{s1}$ のとき

$$\begin{aligned} d_{2i} &= 0 \\ q_i &= 0 \\ S_{2i} &= (r_i - E_1 + \frac{P_1 f_i + f_{i-1}}{2}) \Delta t + S_{2i-1} \end{aligned} \quad (19)$$

(b) $t_{s1} \leq t \leq t_r$ のとき

貯留高によって、① $S_{2i} < h_c$ 、② $h_c < S_{2i}$ の2通りが想定される。

① $S_{2i} < h_c$ のとき

$$\begin{aligned} d_{2i} &= 0 \\ q_i &= 0 \\ S_{2i} &= (r_i - E_1 + \frac{P_1 f_i + f_{i-1}}{2}) \Delta t + S_{2i-1} \end{aligned} \quad (20)$$

② $h_c < S_{2i}$ のとき

$$\begin{aligned} d_{2i} &= \lambda_c (S_{2i} - h_c) \\ d_i &= \lambda_c (S_{2i} - h_c) \\ S_{2i} &= \frac{r_i - E_1 + (\lambda_c + \lambda_d) h_c / 2}{1 / \Delta t + (\lambda_c + \lambda_d) / 2} \\ &+ \frac{S_{2i-1} / \Delta t - (d_{2i-1} + d_{2-1}) / 2}{1 / \Delta t + (\lambda_c + \lambda_d) / 2} \end{aligned} \quad (21)$$

以上のようにして降雨中の各時間ステップ $t = i \Delta t$ におけるタンクの貯留高とこれに応じた滴下量ならびに樹幹流下量が算定される。Fig. 1(a)における降雨中のパラメータの内実際に変数として同定計算されるのは λ_a 、 λ_b 、 λ_c 、 λ_d 、 h_a および後述の蒸発強度の定義式(30)における α_1 である。残りのパラメータは樹冠通過雨量、樹幹流下量のデータから得られる滴下、樹幹流下の開始時刻 t_{d1} および t_{s1} を利用して解析的に求める。すなわち、 h_a には式(16)において $t = t_{d1}$ (滴下の開始時刻) での貯留高 S_{1i} を、 h_c には式(19)において $t = t_{s1}$ (樹幹流下の開始時刻) での貯留高 S_{2i} をそれぞれ与える。また樹冠の幾何形状に関するパラメータである P_1 、 P_2 は対象とする樹木の樹冠を下からカメラで撮影した結果からそれぞれ $P_1 = 0.4896$ 、 $P_2 = 0.0544$ を与えている。

パラメータの同定計算は、樹幹流下量推定誤差の二乗和を評価関数SFとして非線形最小二乗法のプログラムにより行った¹³⁾。

$$SF = \sum \{ Q_i^* - Q_i \}^2 \quad (22)$$

ここに、 Q_i^* は観測樹幹流下量、 Q_i は推定樹幹流下量である。

2) 降雨終了後のパラメータ同定法

降雨終了後も貯留高の計算は式(14)、(15)による。ただし、降雨終了後では樹冠タンクから樹幹タンクへの流入はないので、 $r_i = 0$ 、 $f_i = 0$ である。なお、降雨終了後の蒸発強度は E_2 とする。

樹冠タンク：

① $S_{1i} < h_{a2}$ のとき

$$\begin{aligned} d_{1i} &= 0 \\ S_{1i} &= S_{1i-1} - E_2 \Delta t \end{aligned} \quad (23)$$

② $h_{a2} < S_{1i}$ のとき

$$d_{11} = \lambda_{a2} (S_{11} - h_{a2})^2$$

$$S_{11} = (-B \pm D) / 2A \quad (24)$$

ここに、

$$A = \lambda_{a2}$$

$$B = 2 / \Delta t - 2 \lambda_{a2} h_{a2}$$

$$C = \lambda_{a2} h_{a2}^2 + d_{11-1} + 2E_2 - 2S_{11-1} / \Delta t$$

$$D^2 = B^2 - 4AC \quad (25)$$

である。この場合、2つの解のうち h_{a2} よりも大きいものを、また、2つとも大きい場合はどちらか小さい方を解として採用する。

樹幹タンク：

$$\textcircled{1} S_{1i} < h_{c2} \text{ のとき}$$

$$d_{21} = 0$$

$$q_1 = 0$$

$$S_{21} = S_{21-1} - E_2 \Delta t \quad (26)$$

$$\textcircled{2} h_{c2} < S_{1i} \text{ のとき}$$

$$d_{21} = \lambda_{d2} (S_{21} - h_{c2})^2$$

$$q_1 = \lambda_{c2} (S_{21} - h_{c2})^2$$

$$S_{21} = (-B \pm D) / 2A \quad (27)$$

ここに、

$$A = \lambda_{c2} + \lambda_{d2}$$

$$B = 2 / \Delta t - 2 (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) h_{c2}$$

$$C = (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) h_{c2}^2 + (d_{21-1} + q_{1-1}) + 2E_2 - 2S_{21-1} / \Delta t$$

$$D^2 = B^2 - 4AC \quad (28)$$

この場合も、2つの解のうちで、 h_{c2} よりも大きいもの、また、2つとも大きい場合はどちらか小さい方を解として採用する。ただし、簡単のために、降雨終了後については実際に変数として同定計算されるパラメータは E_2 のみとして、降雨中の場合と同様に樹幹流下量推定誤差の二乗和SFを最小にするものを非線形最小2乗法で探索した。残りのパラメータは、まず式(29)の第2式と第3式を第4式に代入して h_{c2} を求める。 h_{a2} は第1式と降雨終了時から滴下終了までの期間に関する樹冠タンクの水収支式(1)とを連立することで得られる。

$$\lambda_{a2} = d_1^* / (S_1^* - h_{a2})^2$$

$$\lambda_{c2} = q^* / (S_2^* - h_{c2})^2$$

$$\lambda_{d2} = d_2^* / (S_2^* - h_{c2})^2$$

$$h_{c2} = S_2^* - \{ (d_2^* + q^*) / (\lambda_{c2} + \lambda_{d2}) \}^{1/2} \quad (29)$$

なお上式中の添字 * は降雨終了時における量であることを表す。

3. 降雨中および降雨終了後の蒸発強度

降雨終了後の蒸発強度 E_2 は式(31)のようにPenman

の可能蒸発強度¹⁶⁾ E_{pp} に適切な蒸発係数 α_2 を乗ずることで与える。ただし、降雨中における蒸発強度は樹冠面の付着水量に依存すると考え、降雨中蒸発強度 E_1 を式(30)のようにタンクの貯留高 S_1 と E_{pp} との積に比例した形で与える⁴⁾。したがって、降雨中、降雨終了後ともに蒸発強度 E は未知量として扱われることから、降雨中では α_1 が、降雨終了後では α_2 がそれぞれ同定されるべきパラメータとなる。

降雨中：

$$E_1 = \alpha_1 E_{pp} S_{1i-1} / h_a \quad (30)$$

降雨終了後：

$$E_2 = \alpha_2 E_{pp} \quad (31)$$

4. 室内実験によるモデルの検証

1) 室内実験の概要

以下に記すようなモデル構造に関する3つの仮定の妥当性を検証するために別途室内実験を行った⁴⁾。

- ①降雨中と降雨終了後ではモデルパラメータの値を変化させる。
- ②樹幹流下強度 q ならびに滴下強度 d は、降雨中の場合には樹冠付着量 S の1次式で、降雨終了後は2次式で表されるとする。
- ③モデルは樹幹部と樹冠部をそれぞれ表現する2つのタンクから構成される¹⁴⁾。

Fig. 2 Experimental apparatus

実験はFig. 2に示す装置を用いて行った。対象とする樹木には樹高約2mのモミ、クス、サンゴジュの3種類を採用した。測定項目は樹冠通過雨量、樹幹流下量の経時変化と滴下および樹幹流下の開始時刻、終了時刻である。また、台秤と電子天秤を組み合わせた装置で樹木全体の重量を計測し、付着水量の経時変化も捉えた。なお、この実験は室内において極めて高湿度な状態で行われたため蒸発量はないものとしている。

模擬降雨は降雨発生装置を用いて20mm/hourのものを1回降らせる場合と、複数回の降雨を想定し、20mm/hourおよび60mm/hourのものを2回に分けて降らせる場合の2種類について行った。

2) 室内実験データによるモデルの検証

Fig. 3はモミ (*Abies firma*) を対象として $r=20\text{mm/hour}$ の降雨を16分間発生させた実験結果に、本モデルを適用した例である。Fig. 4はサンゴジュ (*Viburnum awabuki*) を対象として、 $r=20\text{mm/hour}$ の降雨を最初30分間発生させた後に、12分間において再び24分間同じ強度の降雨を発生させた実験結果に本モデルを適用した例である。Fig. 5はクス (*Cinnamomum camphora*) を対象として、 $r=60\text{mm/hour}$ の降雨を最初30分間発生させた後に、6分間において再び20分間同じ強度の降雨を発生させた実験結果に本モデルを適用した例である。いずれの場合も本モデルにより樹幹流下強度がよく再現されている。本モデルの構造から樹幹流下強度が的確に表現できていれば樹幹流下強度を規定する付着水量も同程度の精度で推定できているものと期待できる³⁾。

5. 地形を考慮したPenmanの可能蒸発強度の算定法

1) 任意斜面の受ける全天日射量の算定

任意の方位と傾斜角を有する斜面が受ける全天日射量は岡上¹⁵⁾の方法によると、次式を用いて水平面の全天日射量 H_0 から斜面上の全天日射量 H が算定される。

$$H = H_0 \cdot n^* \quad (33)$$

$$n^* = \{1 - (\sin k \cdot \cosh \cdot \cos \theta + \cos k \cdot \sin \theta)^2\}^{1/2} \\ \cdot \cos(\omega t + \alpha) \cdot \cos \delta + (\sin k \cdot \cosh \cdot \cos \theta \\ + \cos k \cdot \sin \theta) \cdot \sin \delta$$

ここに、 k : 斜面の傾斜角、 h : 方位角、 θ : 緯度、 δ : 赤緯、 ω : 地球の自転角速度、 t : 時刻 (正午を0とする) である。

2) 時間あたりの全天日射量の算定

Fig. 3 Estimated stemflow rate q (*Abies firma*)

Fig. 4 Estimated stemflow rate q (*Cinnamomum camphora*)

Fig. 5 Estimated stemflow rate q (*Viburnum awabuki*)

全天日射量 H は太陽から直接届く直達日射量 H_b と天空内で散乱された後で地表に届く散乱日射量 H_d とからなることから、小池ら¹²⁾の方法にしたがい、まず日単位の散乱日射量 H_d と直達日射量 H_b に分離する。時間あたりへの分配はそれぞれ別々に余弦の2次関数により行い、両者の和から時間あたりの全天日射量を算定する。

3) Penman式による可能蒸発強度の算定

蒸発強度の規準量としてPenmanの可能蒸発強度を採用する。その際に必要となる純放射量はChang¹¹⁾

の式によった。

6. 降雨遮断量の算定方法

1) 降雨中と降雨終了後の区分法

降雨中と降雨終了後の区分は以下の手順によった。まず降雨データを読み込み、初めて降雨を記録した時刻を第一降雨の開始時刻 J_1 とする。一連の降雨が終了する時刻を J_2 と定義し、続いて再び降雨が記録される時刻を仮に第二降雨の開始時刻 J_4 とし、 $J_3=J_4-1$ と定義する。このとき、 J_2 と J_3 の間隔が12時間以上ある場合について両者は別の降雨と見なし、改めて J_3 を第一降雨の終了時刻、 J_4 を第二降雨の開始時刻とそれぞれ定義する。 J_2 と J_3 が12時間以下である場合には、所定の条件を満足するまで降雨データを検索する。

2) 降雨中と降雨終了後でのモデルの切り替え

降雨終了時刻の前後ではモデルパラメータが切り替わるため、滴下量、樹幹流下量のデータに不連続を生ずる。そこで、こうした不連続を避けるために、孔の高さに関するパラメータは固定した上で降雨終了後の孔の大きさに関するパラメータの値のみを、その時刻におけるタンクからの流出量によって変化させることにした。

3) 降雨遮断量の算定手順

降雨中、降雨終了後のいずれともその時刻の樹冠タンク、樹幹タンク内の貯留高から算定される。

降雨中は任意時刻の降雨量とタンクからの滴下量、樹幹流下量ならびに式(30)で算定される蒸発量を用いてタンクの水収支計算を行い、水収支式を満足する計算単位時間(1分)後の貯留高が定まる。貯留高が算定されれば、改めて式(30)より蒸発強度を確定する。降雨終了後はタンクへの入力となる降雨が存在しないので、タンクからの流出量のみを用いて水収支計算を行い、貯留高を計算し、蒸発強度を式(31)から算定する。

III. 実森林流域からの遮断蒸発量の推定と評価

1. 対象流域とデータの概要

1) 対象流域

対象とする徳島県白川谷森林試験地をFig. 6に示す。流域面積は23ha、標高は約740m~1140m、流域平均斜面勾配 $\theta=21.5^\circ$ である。地質は三婆川帯に属し、砂質片岩または砂質片岩と泥質片岩の互層からなる。流域土壌のほとんどは褐色森林土である。

Fig. 6 Sketch of Shirakawadani experimental catchment

林相は流域上流部の約2/5が天然広葉樹林(21~25年生)で、流域中央から下流にかけてはスギの人工樹林(16~30年生)となっている。

2) 観測データ

雨量データとしては林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流下量をそれぞれ転倒マス型雨量計(樹冠通過雨量については2カ所)で10分毎に観測しているほかに、樹冠通過雨量については、なるべく面的な情報を入力するため、水平射影面積72089cm²の集水板を使用して集水し、一転倒500ccの転倒マス型流量計で併せて観測している。平均樹冠半径が実測より2.24mであったことから、樹木の支配面積は半径2.24mの円面積と仮定してデータの整理を行った。同時に現地では気温、相対湿度、風向、風速ならびに純放射量の観測を行っているが、データが欠測となっている期間については、水資源公団池田ダム総合管理所での観測値を補正して用いた。同一期間の白川谷試験地と池田のデータを抽出し、両者の相関を気温、湿度についてそれぞれ検討したところ、いずれも高い相関が認められたことから両者の回帰直線を利用してデータの補正を行った。なお解析期間は1990年12月1日から1991年11月31日の1年間である。

2. モデルパラメータ同定結果

モデルパラメータの同定は、Table. 1に示すような降雨特性を有する合計9つの降雨イベントについて行った。モデルの同定方法は個々の降雨イベントについて同定する場合(Method 1)と全ての降雨イベントを通して一つのパラメータを同定する場合(Method 2)の2通りについて行った。まず最初は個々の降雨イベントについて同定する場合(Method 1)を行った。植生状態や降雨特性の季節変化を考慮

Table. 1 Characteristics of rainfall events

DATE	Total rainfall (mm)	Duration (min)	Peak intensity (mm/hour)	Stenflow (mm)	Throughfall (mm)	Interception loss (mm)
3/11	22.0	760	6.0	1.03	21.3	-0.3
5/27	27.5	320	27.0	0.61	22.8	4.1
6/30	57.8	2040	33.0	0.81	41.5	15.5
7/17	16.0	460	18.0	0.11	11.3	4.6
8/10	26.4	270	39.0	0.38	22.3	3.7
10/16	26.4	1050	6.0	0.82	17.9	7.7
11/ 8	18.2	730	9.0	0.30	19.3	-1.4
12/17	23.7	1980	6.0	0.76	23.8	-0.9
12/23	41.8	1570	12.0	1.90	40.8	-0.9

Table. 2 Model parameters identified by Method 1

《Spring & Summer》

DATE	λ_a	λ_b	λ_d	λ_c	h_a	h_b	h_c	λ_{a2}	λ_{d2}	λ_{c2}	h_{a2}	h_{c2}	α_1	α_2
3/11	1.86	1.98	0.05	1.41	0.79	9.99	1.48	1070	0.03	0.92	1.25	1.12	2.01	2.98
5/27	1.58	1.88	1.23	0.39	1.34	5.30	1.34	1814	1.05	0.33	1.74	1.08	2.26	3.00
6/30	1.42	1.76	0.96	0.85	1.88	5.29	2.19	530	1.09	0.96	6.18	5.84	2.99	3.00
7/17	1.11	2.29	1.28	0.36	0.86	5.04	5.02	2066	1.74	0.49	1.22	4.87	2.03	2.75
8/10	3.86	3.31	2.03	0.57	2.75	4.76	6.10	1504	1.53	0.43	2.88	5.78	2.47	2.99
AVE.	1.97	2.24	1.11	0.72	1.52	6.08	3.23	1397	1.09	0.62	2.65	3.74	2.35	2.94

《Autumn & Winter》

DATE	λ_a	λ_b	λ_d	λ_c	h_a	h_b	h_c	λ_{a2}	λ_{d2}	λ_{c2}	h_{a2}	h_{c2}	α_1	α_2
10/16	2.56	3.07	0.05	0.77	1.30	10.0	5.59	1208	0.02	0.36	1.64	5.12	2.49	3.00
11/18	1.70	3.05	0.05	0.27	1.51	10.0	2.84	350	0.06	0.33	3.19	6.86	2.45	2.98
12/17	4.99	2.99	0.05	0.71	1.44	2.09	3.64	2742	0.04	0.69	1.54	3.44	2.00	2.99
12/23	2.87	1.14	1.63	1.79	0.36	1.26	2.26	1164	0.04	0.05	0.53	0.02	2.01	2.46
AVE.	3.03	2.56	0.44	0.88	1.15	5.83	3.58	1366	0.04	0.36	1.72	3.86	2.24	2.85

して、合計9ケースの同定結果を主として春季および夏季の5ケースと秋季および冬季の4ケースに分けてTable. 2に示す。季節や降雨条件が異なるために、個々のケース毎で若干ばらついているのは否めないが、別途パラメータに関する感度分析を行って見たところ最終的に遮断量の推定値に与える影響はほとんど認められなかった¹⁰⁾ことから年間を通して一つのパラメータ値で代表できそうである。

同定されたパラメータの内で樹冠および樹幹への可能付着水高と関連するパラメータの妥当性について検討を行う。樹冠タンクからの滴下量および樹幹流下量を規定する流出孔の高さを表すパラメータについて見ると、降雨中の h_a 、 h_c は平均的にそれぞれ1.15~1.52mm、3.23~3.58mmであり、降雨終了後に

については h_{a2} 、 h_{c2} がそれぞれ1.72~2.65mm、3.74~3.86mmとなっている。参考のために実測値に基づく降雨量と樹冠通過雨量、降雨量と樹幹流下量の関係をFig. 7にまとめて示す。図中の直線は降雨量と樹冠通過雨量および樹幹流下量の回帰直線であり、黒色のシンボルはTable. 1に示した降雨イベントに関するデータであることを示す。樹冠および樹幹への可能付着水高はそれぞれに関するグラフの横軸とそれぞれの回帰直線との交点の値として表現されるはずである。Fig. 7によるとそれぞれ樹冠通過雨量については0.985mm、樹幹流下量については3.47mmとなっており、同定された滴下、樹幹流下に関する流出孔の高さを表すパラメータの値とほぼ等しい。一般に針葉樹について飽和付着水高はおおむね1.0mm

Table. 3 Model parameters identified by Method 2

λ_a	λ_b	λ_d	λ_c	h_a	h_b	h_c	λ_{a2}	λ_{d2}	λ_{c2}	h_{a2}	h_{c2}	α_1	α_2
2.56	3.07	0.05	0.77	1.30	10.0	5.59	1208	0.02	0.36	1.64	5.12	2.49	3.00

Table. 4 Estimated interception loss

CASE	Precipitation (mm)	Interception loss (mm)	Percentage of interception(%)
Method 1	2407	313.59	13.03
Method 2	2407	320.94	13.33

Fig. 7 Relationships between precipitation R and throughfall R_t , stemflow Q

とされているが、本モデルで $P_1 h_{a2} + P_2 h_{c2}$ として与えられる樹木全体の付着水量は1.04~1.51mmとなることから、ほぼ妥当な同定結果が得られていると考える。

年間を通して一つのパラメータ値で代表できる目処が立ったことから、9つの降雨イベント全体を通して一つのパラメータ値を同定する場合(Method 2)での結果をTable. 3に示す。

3. 白川谷試験地における降雨遮断量の推定結果

1) 降雨遮断量の推定結果

解析期間を大まかに夏季(3月~8月)と冬季(9月~2月)に分けて遮断量を推定した場合をFig. 8に、年間を通して一つのパラメータで推定した場合をFig. 9にそれぞれ示す。それぞれの図中における直線は降雨量 R と遮断量 I の回帰直線を表す。また、Method 1およびMethod 2について推定した遮断蒸

Fig. 8 Relationship between precipitation R and estimated interception loss I by Method 1

Fig. 9 Relationship between precipitation R and estimated interception loss I by Method 2

発量ならびに遮断蒸発量と降雨量との比で定義する遮断率をまとめてTable. 4に示す。Fig. 8とFig. 9を比較した結果からもMethod 1とMethod 2とはほとんど差が見られないことから、年間を通したパラメータで十分に代表できていると判断される。

1991年7月1日から9月30日の期間において雨量を観測したスギ(約25年生)に関して、一降雨について実測遮断蒸発量(=降雨量-樹幹流下量-樹幹通過雨量)と推定値との比較をFig. 10に示す。推定値は実測値をよく再現できている。また、1991年8月10日での一降雨についてモデルによる樹幹流下強度と

Fig. 10 Comparison of observed and estimated interception loss

遮断蒸発強度の再現性を示したのがFig. 11である⁶⁾。ここでの実測遮断蒸発強度は「ある時刻 t までに地表に到達していない水分量の和」と便宜的に定義して次式により算定した。

$$\sum_{i=0}^t (r_i - r_{di} - q_i) \quad (34)$$

樹幹流下強度、遮断蒸発強度はともに全般によく再現されていることから、本モデルは樹冠における付着水の動態を十分にシミュレートできると判断される。

2) 平均降雨中蒸発強度と平均降雨強度の関係

塚本ら²²⁾の観測結果では一般に降雨強度が大きくなるほど蒸発強度も大きくなっている。そこで降雨強度が蒸発強度に及ぼす影響を検討するために平均降雨強度とモデルにより推定した降雨中の平均蒸発強度の関係を示したのがFig. 12である。図中の直線は両者を線形回帰した結果である。若干のばらつきはあるものの両者はほぼ比例関係にある。

湿度が高く、純放射量が小さい状況下で、降雨中の蒸発強度が通常の微気象学的手法から推定される蒸発強度を上回ったり、降雨強度に比例して増加する現象について従来は森林地における空気力学的抵抗 r_a が小さいことを根拠として挙げているが、単に r_a に関する議論だけでは、例えばPenman-Monteith式を用いても降雨中蒸発強度が降雨強度に比例するという観測事実を説明できない。

上記のような問題点に答えるために著者らは以下のように考えている。

実森林において降雨中はほぼ平衡状態に達していると考えられることから、降雨強度が増加すると樹

Fig. 11 Estimated stemflow rate q and interception loss I on Aug. 10, 1991.

Fig. 12 Relationship between mean rainfall intensity $\bar{r}$ and mean evaporation rate during rain $\bar{E}_r$

冠の濡れ面積、すなわち蒸発可能な面積が増加する。加えて、雨滴が樹冠に衝突し、増加した付着水が飛沫となって飛び散るために樹冠付近を浮遊する水分量が増加する。滞空中に水分の一部は気化し、一部は移流によって他所へ輸送される。したがって

- ①降雨強度に比例して濡れ面積が増加すること。
- ②飛沫になる水分量が増加すること。

の2つの理由から降雨中蒸発強度は降雨強度に比例する。

上記の仮定に基づき、本研究では降雨中蒸発強度を式(30)のように樹冠の付着水分高とPenmanの可能蒸発強度との積に比例するものとして定式化しているが、Fig. 12よりこの仮定の妥当性が検証されたと考える。

3) 降雨中蒸発量と降雨継続時間の関係

降雨強度の大きさ別に分けて、降雨中蒸発量と降雨継続時間の関係を示したのがFig. 13である。図中の直線は両者の回帰直線である。これより降雨強度がほぼ等しいならば、降雨継続時間が長いほど降雨中蒸発量も大きくなっており、既往の観測結果とも定性的に一致する。実森林では降雨継続時間が長くなると降雨中における付着水分の蒸発機会が増加す

Fig. 13 Relationship between rainfall duration T_r and total evaporation during rain ΣE_1

ると考えれば納得できる。

4) 降雨中蒸発量と降雨終了後蒸発量の関係

Fig. 14は全遮断蒸発量に占める降雨中蒸発量と降雨終了後蒸発量の割合を示したものである。降雨終了後に樹冠の付着水が蒸発する分は年間を通してほぼ一定であり、しかも量的にはごくわずかである。つまり、そのほとんどは降雨中の蒸発量で占められていることが判る。したがって降雨量と遮断蒸発量の比例関係は、主として降雨中蒸発量に起因することが確認できる。

同時に、このことは流域の遮断蒸発量を推定する上で降雨中の蒸発量を的確に算定する重要性を示唆していると言えよう。すなわちこうした観点からも、遮断蒸発量を推定するためには、本モデルのように樹冠の濡れ具合を的確に表現できることが必要不可欠な条件となる。

IV. おわりに

本研究では、蒸発過程と密接に関連する樹冠の濡れ具合をモデル化し、林外雨量、樹冠通過雨量、樹幹流下量、気温、湿度、風速ならびに日照時間のデータから降雨遮断蒸発量推定法を提案した。その際、蒸発量算定のベースとなるPenmanの可能蒸発強度の推定にあたって、斜面の方位と傾斜角を考慮に入れることで流域の日射環境をなるべく再現するように努めた。本研究で得られた結論を要約すると以下のようである。

1) 本研究で対象としたスギの場合、モデルパラメータに季節的な変化傾向は見いだされなかった。したがって年間を通してそれぞれのパラメータにつき、一つの値で代表させてもほとんど差し支えがない。モデルの簡便さという観点でいえば代表パラメータで計算する方が望ましい。

Fig. 14 Relationship between total evaporation during rain ΣE_1 and after rain ΣE_2 .

- 2) 本モデルによる一降雨に関する降雨遮断蒸発量の推定値は現地で観測した林外雨量、樹冠通過雨量ならびに樹幹流下量の水収支から算定した遮断量と良好に一致した。
- 3) 1時間単位についてモデルにより樹冠付着水の動態を再現することができた。このことから本モデルにより、一降雨単位はいうまでもなく、降雨中の1時間単位についても十分に蒸発量を推定することができる。
- 4) モデルによる推定値から降雨終了後の蒸発量、すなわち樹木付着水は年間を通してほぼ一定であって全降雨遮断蒸発量に占める割合としては小さく、むしろ降雨中蒸発量がかなりの割合を占めることが示された。このことは改めて降雨中蒸発量を的確に推定する必要性を示唆している。
- 5) 平均蒸発強度は平均降雨強度に比例することがモデルによる推定値より確認された。この関係は4)とも関連して降雨中の蒸発強度に起因すると考えられる。
- 6) 降雨中蒸発量が降雨終了後の蒸発量を上回る現象ならびに降雨中蒸発量が降雨強度に比例する現象については、雨水が樹冠に衝突した際に、付着水がはじかれて大気中へ還元される機構を考えることでうまく説明できる。

このように単木についてはあるが、本モデルを用いることで蒸発量を十分に推定できた。したがって、これで流域スケールでの蒸発量推定法としてその方法論の基礎はできたと考える。しかしながら、流域蒸発量を推定するためには流域内の斜面特性の違いによる影響評価や流域を代表する射影面積割合 P_1 , P_2 の決定法などさらに検討を加えるべき課題がある。今後はこうした課題を解決した上で流域蒸発量推定法を確立するつもりである。

最後に本研究の遂行にあたって一部を日本生命財団研究助成金(代表 村岡浩爾 大阪大学教授)より補助を受けました。また大学院生の高橋将人君(現大林組), 中谷達志君(現パシフィックコンサルタンツ)ならびに木村誠君には計算, 図表の作製などでご協力をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

引用文献

- 1) Chang, J. (1970): Global distribution of net radiation according to a new formula, Ann. Assn. Am. Geogr., **60**, pp. 340~351.
- 2) 江原貞吉・桃井治三郎 (1917): 農商務省山林局森林測候所報告第4号。
- 3) 端野道夫・大槻恭一 (1988): 樹木の降雨遮断モデルとパラメータ推定法に関する実験的研究, 土木学会水理講演会論文集, **32**, pp. 19~24.
- 4) 端野道夫・吉田弘・高橋将人 (1989): 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.
- 5) 端野道夫・吉田弘・中谷達志・木村誠 (1991): 降雨遮断モデルにおける蒸発の定式化について, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp. 30~33.
- 6) 端野道夫・吉田弘・木村誠・中谷達志 (1992): 遮断モデルによる樹冠蒸発特性の解析, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp. 168~171.
- 7) 端野道夫・吉田弘・中谷達志 (1991): 実森林樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討, 土木学会水工学論文集, **35**, pp. 87~92.
- 8) 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治 (1982): ヒノキ林における樹冠遮断雨量とその微気象学的解析, 林試研報, **318**, pp. 79~102.
- 9) Horton, R.E. (1919): Rainfall Interception, Mon. Weath. Rev., **47**, pp. 603~623.
などそのほか多数。
- 10) 木村誠 (1991): 実森林樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討, 平成3年度徳島大学工学部建設工学科卒業論文。
- 11) 吉良竜夫 (1976): 陸上生態系 生態学講座 2, p. 166, 共立出版。
- 12) 小池俊雄・佐渡公明・橋本大・坂本和則・西館昌之 (1991): AMeDAS日照時間による日射量推定の総合化, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp. 26~29.
- 13) 小谷恒之 (1979): 非線形多変数関数の極小化, 大阪大学大型計算機センタニュース, **32**, pp. 27~48.
- 14) 中谷達志・端野道夫・吉田弘・高橋将人 (1990): 降雨遮断タンクモデルの比較検討(2), 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第2部, pp. 80~81.
- 15) 岡上正夫 (1957): 斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法, 日林誌, **39**, pp. 435~437.
- 16) Penman, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy Soc. London, Series A. **193**, pp. 120~145.
- 17) Rutter, A.J., Kershaw, K.A., Robins, P. C. and Morton, A.J. (1971/1972): Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine, Agr. Meteorol., **9**, pp. 367~384.
- 18) 鈴木雅一・加藤博之・谷誠・福嶋義宏 (1979): 桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流量, 遮断量の研究 (II) 遮断量の解析, 日林誌, **61**, pp. 391~398.
- 19) 只木良也・吉良竜夫 (1982): ヒトと森林-森林の環境調節作用, p. 82, 共立出版。
- 20) 高木不折 (1977): 地下水流出のモデル化について, 土木学会水工学夏期研修会講義集, A-6.
- 21) 武田京一 (1951): 林地雨量について, 気象集誌, **9** (6), pp. 19~32.
- 22) 塚本良則・太田猛彦・峯村徹哉 (1988): 降雨中の樹冠蒸発, 水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp. 40~41.
- 23) 塚本良則編 (1992): 森林水文学, pp. 86~87, 文永堂。

(受付1992年8月3日, 受理1992年12月4日)