

樹木による降雨遮断機構のモデル化

徳島大学工学部 正員 〇端 野 道 夫
フジタ建設コンサルタント 井 内 浩 明

1. は し が き

森林の降雨遮断機構は流域からの蒸発散に深く関係していることより、古くから研究されており、一般に降雨遮断量 R_i は降雨量 R の一次式: $R_i = a_i R + b_i$ で表されることが広く知られている。しかし、この式では、降雨強度、降雨継続時間、降雨間隔時間等を考慮することができない。また、得られた係数 a_i 、および定数 b_i は現データと同じ気象条件、同じ森林に対してしか有効でない。こうした点を踏まえ、武田¹⁾は1951年に早くも降雨遮断機構の数理モデルを提案し、理論的に樹幹流量、樹間通過量、降雨遮断量を推定する試みをしている。この数理モデルは現在の(流出解析モデルの)タンクモデルに相当する。しかし、日本ではこの種のアプローチがその後途絶えている。一方、Rutterら²⁾は1971年に前述の武田モデルとは若干異なる“樹木”タンクモデルを提案し、蒸発散量の推定に利用している。

本文では、武田モデルの改良と検証を兼ねて、より適切な“樹木”タンクモデルを設定することを目的とし、三種類(約1.8mの高さのスギ、モミ、サンゴジュ)の単木に人工降雨を降らせ、モデルパラメータ推定のためのデータとする。これよりモデルの妥当性およびパラメータ推定法を検討する。

2. 実験方法の概要

図-1に示すように、単木に一定強度の人工降雨を降らせ、樹間通過量(枝葉からの雨滴落下量と直達降雨量の和)と樹幹流量を計測する。樹間通過量は1.2×1.2mの集水板で受け、これを幅2mmの矩形堰に導く。樹幹流量は市販の500ccメスシリンダーに導く。降雨強度は一定とし、降雨開始より樹幹流量および樹間通過量が定常になるまで十分な時間を置き、降雨を停止する。降雨強度は定常時の樹幹流量強度と樹間通過強度より逆算する。降雨停止後の樹幹流量および雨滴落下量も記録する。その他、降雨開始時より、枝葉からの雨滴落下が始まる時間 t_{a1} 、樹幹流量が始まる時間 t_{s1} (本実験の場合 $t_{a1} < t_{s1}$) を目視観測した。

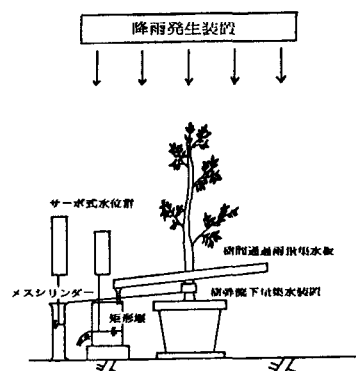


図-1 実験装置

3. 降雨遮断モデル

枝葉、樹幹からなる樹木全体を一つのタンクに見なし、このタンクに関する水収支式を立てると、次式のようなものである。

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

ここに、 S :樹木の雨水貯留高、 r :降雨強度、 E :蒸発散強度、 d :枝葉の付着水が樹幹流とはならず、地表面に落下する、いわゆる枝葉からの雨滴落下強度、 q :樹幹流量強度、である。 d, q については次式のように、貯留高 S の関数とし、降雨中($r>0$)と降雨停止後($r=0$)では、一般にパラメータは異なるものとする。

$$d \equiv D/\{(1-p)A\} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq h_d, r>0; 0 \leq S \leq h_{d2}, r=0) \\ \lambda_d(S-h_d) & (h_d \leq S, r>0) \\ \lambda_{d2}(S-h_{d2}) & (h_{d2} \leq S, r=0) \end{cases} \quad (2)$$

$$q \equiv Q/\{(1-p)A\} = \begin{cases} 0 & (0 \leq S \leq h_s, r>0; 0 \leq S \leq h_{s2}, r=0) \\ \lambda_s(S-h_s) & (h_s \leq S, r>0) \\ \lambda_{s2}(S-h_{s2}) & (h_{s2} \leq S, r=0) \end{cases} \quad (3)$$

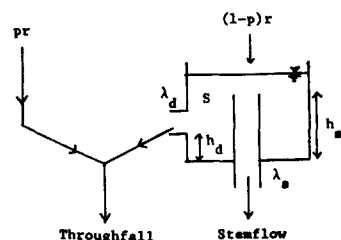


図-2 降雨遮断モデル
(降雨中のとき)

ここに、 A ：樹木の枝葉の及び範囲を含む基準面積、 p ：基準面積 A に降った降雨分の内、枝葉にまったく触れずに樹間を通過する、いわゆる直達降雨の割合、 Q ：樹幹流下量、 D ：枝葉からの雨滴落下量、である（図-2 参照）。前述の武田モデルとは次の二点で基本的に異なる。①蒸発散強度 E は、武田モデルでは貯留高 S に比例させていたが、本モデルでは、主として気象条件（風、気温、湿度等）によって別途、規定されるものとする。② p 以外のパラメータ $\lambda_s, \lambda_d, h_s, h_d$ の値は降雨停止後、 $\lambda_s \rightarrow \lambda_{s2}, \lambda_d \rightarrow \lambda_{d2}, h_s \rightarrow h_{s2}, h_d \rightarrow h_{d2}$ に変化するものと仮定する。降雨、樹幹流下、樹間通過の観測資料よりモデルのパラメータが同定されれば、実際に直接測定することが容易でない蒸発散量をモデルより逆推定することができる。

4. 樹幹流下量、樹間通過量、降雨遮断量と降雨量の関係式

一定強度 r の降雨があり、樹幹流下および雨滴落下が定常になるまで十分長く降雨が続いた場合を考える。雨滴落下開始時刻 t_{d1} が樹幹流下開始時刻 t_{s1} より早いとき ($t_{d1} < t_{s1}, h_d < h_s$) の降雨量 R と累加樹幹流下量 R_s 、累加樹間通過量 R_t の間の関係式は (1), (3) 式より誘導され、以下のようにまとめられる。

$$R_s = a_s R - b_s, \quad a_s \equiv (1-p)\lambda_s \{r - E - \lambda_d(h_s - h_d)\} / (\lambda_s + \lambda_d) / r, \quad b_s \equiv a_s r [t_{s1} + \{1 / (\lambda_s + \lambda_d)\}] \quad (4)$$

$$R_t = a_t R - b_t, \quad a_t \equiv p + \{(1-p)\lambda_d(h_s - h_d) / r\} + \{a_s \lambda_d / \lambda_s\}, \quad b_t \equiv \lambda_d a_s r / \{\lambda_s (\lambda_s + \lambda_d)\} \\ + (1-p)(r-E)[t_{d1} - \{\lambda_s t_{s1} / (\lambda_s + \lambda_d)\}] + (1-p)(h_s - h_d)[1 + \{\lambda_s \lambda_d t_{s1} / (\lambda_s + \lambda_d)\}] \quad (5)$$

ここに、 t_{d1}, t_{s1} と $h_d, h_s, (r-E)$ の間には次式の関係があることが容易に誘導される。

$$t_{d1}(r-E) = h_d, \quad (t_{s1} - t_{d1})(r-E) \equiv h_s - h_d \quad (6)$$

このような R_s, R_t と R の一次関係は実地の観測からよく知られているところであるが、その係数 a_s, a_t と定数 b_s, b_t の物理的裏付けが多少なりとも本モデルにより可能といえよう。

降雨停止後、樹幹流下が終了し次に雨滴落下も終了した場合 ($h_{s2} > h_{d2}$)、降り始めよりの全降雨遮断量は次式のようにまとめられる。

$$R_i = a_i R + b_i, \quad a_i \equiv (1-p)E / r, \quad b_i \equiv (1-p)[h_s + \{r - E - \lambda_d(h_s - h_d)\} / (\lambda_s + \lambda_d)] \\ - \{r - E\} \{r - E - \lambda_{d2}(h_{s2} - h_{d2})\} / (\lambda_{d2} + \lambda_{s2}) / r - [\lambda_{d2}(h_{s2} - h_{d2})^2 / \{\lambda_{d2}(h_{s2} - h_{d2}) + E\}] \quad (7)$$

5. 実験木に対するパラメータ同定と適合度

降雨強度 r 、雨滴落下開始時刻 t_{d1} 、樹幹流下開始時間 t_{s1} および樹幹流下量の測定データが与えられたものとして、i) 立ち上がり部のデータよりパラメータ $p, \lambda_s, \lambda_d, h_s, h_d$ を、ii) 低減部のデータよりパラメータ $\lambda_{s2}, \lambda_{d2}, h_{s2}, h_{d2}$ をそれぞれ同定する。ただし、樹間通過量のデータは実験に用いた集水板の悪影響をうけていると思われるため、ここでは参考データとし、パラメータ同定には用いなかった。

立ち上がり部の樹幹流下量 R_s と時間 t の関係を図-3 に、低減部の樹幹流下強度 $Q/A = (1-p)q$ と t の関係を図-4 にそれぞれ実測値とモデルによる理論値を示す。これらの図より本モデルは降雨の樹幹流下および枝葉からの雨滴落下特性をほぼ再現することができ、従って、降雨遮断モデルとして利用できるといえよう。

1) 武田京一, 気象集誌, 29 (6), 1951.

2) Rutter, A.J. et al., Agric. Met., 9, 1971.

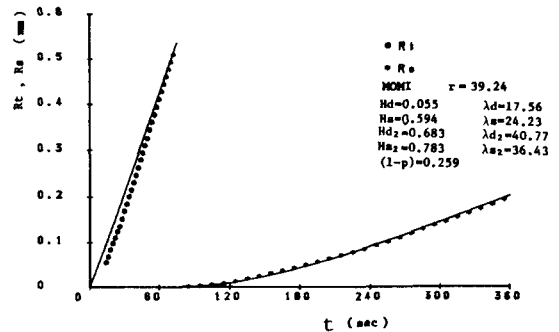


図-3 立ち上がり部の同定

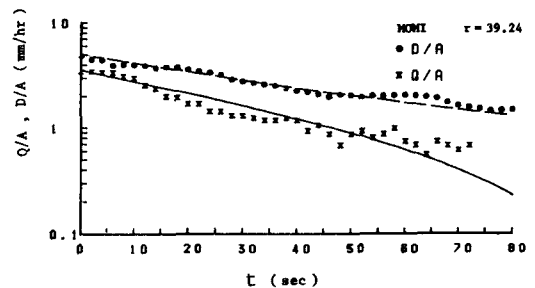


図-4 低減部の同定