

## アカマツ林内の林内雨量シミュレーション

### Rainfall Simulation in a Red Pine Forest

田瀬 則雄\*・間島 政紀\*\*

Norio TASE and Masaki MAJIMA

#### I はじめに

森林植生による降雨のしゃ断については、従来から林学関係者により報告(村井, 1970; 中野, 1976など)されているが、流域の水収支や降雨・流出過程を対象として、森林植生による降雨のしゃ断や保水を考察した研究は比較的少ない。

植生による降雨のしゃ断プロセスを明らかにするためには、林内降雨の時間的な特性と林内における空間的な分布特性を把握しなければならない。本研究は、このような観点から筑波大学構内のアカマツ林において、1981年4月から12月まで雨量観測を行ない、平地アカマツ林の林内雨量特性について分析した。

前報(間島・田瀬, 1982)において、林内降雨の空間的な分布特性を検討したが、本論は、簡単なモデルを作成し、しゃ断、蒸発、樹冠貯留の時間的特性を評価、検討したものである。

また、田瀬(1983)がすでに報告したように、降雨・しゃ断プロセスには解明されなければならない点が多くある。このため本論のモデル化にも多少の問題点が存在するが、このモデル化を通して、その問題点についても若干検討する。

降雨・しゃ断プロセスをモデル化し、しゃ断量を評価しようとした研究には、Rutter et al.(1971)、Gash and Morton(1978)、Gash (1979)、鈴木ほか(1979)がある。これらのモデルのもとになるしゃ断プロセスの模式図を第1図に示した。この

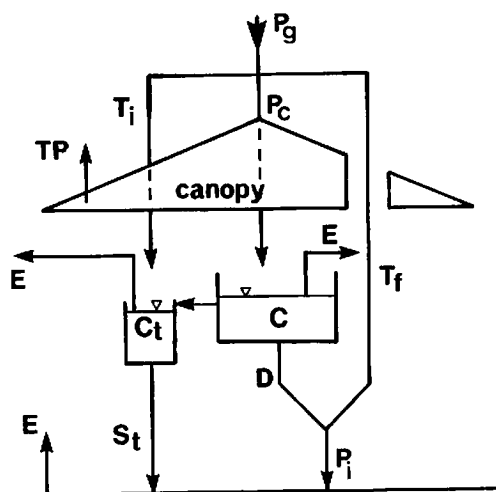
図の中の蒸散については、上のどのモデルにも考慮されていない。これらのモデルはいずれも貯留型で、その目的は年間あるいは期間のしゃ断量を推定することにある。そして、これらモデルの相違は、基本的にはパラメータの推定法とタイムステップの相違にある。

これらのモデルの中で最も明解なものは、通過量、樹幹流下量と林外雨量の直線回帰関係を基礎とした鈴木ほか(1979)のモデル(鈴木モデル)で、パラメータの決定法なども明確であるが、直線回帰に時間ファクターを導入する点の妥当性と一降雨ごとの適合性が不明である。Rutter et al. (1971)のモデル(ルッターモデル)は5分間隔で水収支を計算してゆくもので、蒸発量をペンマン式で計算しており、一降雨ごとの適合性はよい。Gash and Morton (1978)はこのモデルを1時間単位に改良したものである。さらに、Gash (1979)はしゃ断量と林外雨量の一次回帰式の係数の物理的意味を検討し、雨量観測からしゃ断量を推定するモデルを提案した。

観測の対象とした林分については前報(間島・田瀬, 1982)で述べた通りであるが、立木密度は26.5本/100㎡、平均胸高直径は21.1cm、樹高は約10m、葉面積指数は4.2~6.6で、ナラ、ウルシ、ササなどの低木類も混生している。前報のように各種の観測機器を設置したが、本論のモデル化の対象としたのはNo.1地点で、0.5mm転倒ます型自記雨量計により林内雨量を観測した(第2図)。

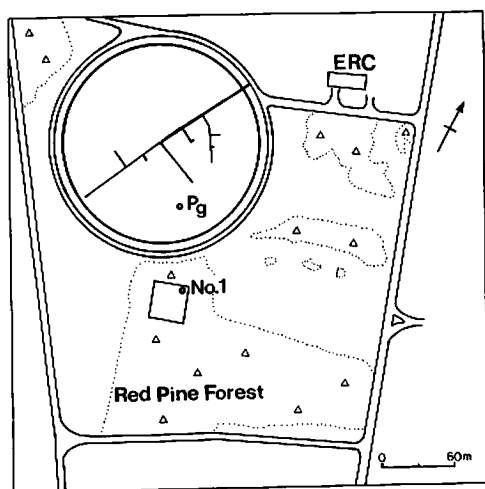
\* 筑波大学地球科学系    \*\* 日本科学技術研修所

(1983年4月28日受理)



- C : Canopy storage
- C<sub>t</sub> : Trunk storage
- D : Drip
- D : Evaporation
- E : Canopy input
- P<sub>g</sub> : Gross rainfall
- P<sub>i</sub> : Throughfall
- S : Canopy capacity
- S<sub>t</sub> : Stem flow
- T<sub>f</sub> : Free throughfall
- T<sub>i</sub> : Trunk input
- TP : Transpiration

第1図 降雨・しゃ断プロセスの模式図



第2図 調査地域

また、林外雨量は100mほど北の圃場内で測定した。観測期間中、56回の降雨があり、林外雨量は875.3mm、林内雨量は566.5mmであった。なおNo.1地点での林内雨量( $P_i$ )と林外雨量( $P_g$ )の一次回帰式は

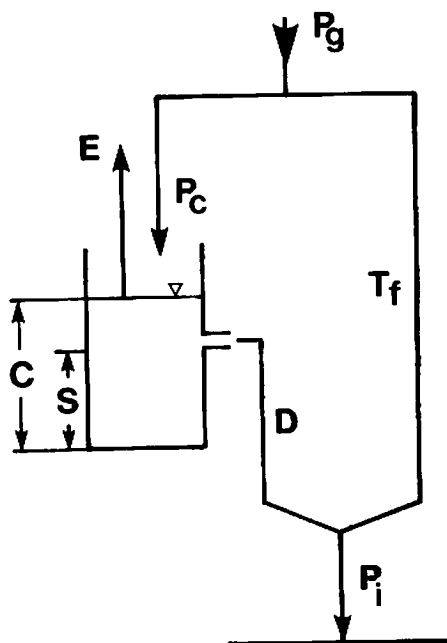
$$P_i = 0.68P_g - 0.516 \quad (r=0.994) \quad (1)$$

となった。

## II モデルの概要

先の降雨・しゃ断プロセスの模式図を簡略化し、

本論で用いた林内降雨モデルを第3図に示した。このモデルはいわゆるタンクモデルであり、林外降雨( $P_g$ )が樹冠貯留( $C$ )への入力( $P_c$ )と直達降雨( $T_f$ )に、それぞれ $(1-\rho)$ と $\rho$ の割合で配分され、樹冠貯留は蒸発( $E$ )と滴下( $D$ )により失われる。ここでは、樹冠貯留( $C$ )への



第3図 モデルの模式図

入力に樹幹流 ( $S_f$ ) が水高にして林外雨量の1~2%と小さかったため(間島・田瀬, 1982), 本モデルには特に加えなかった。この点については、村井(1970)の観測でも60mm以下の降雨では1%以下であり、この仮定は満足できるものと考えられる。

滴下については、滴下が樹冠貯留に密接に関係するという考えから、タンクモデルとし、canopy capacity ( $S$ ) の位置に流出孔を1つ持つ、1段の貯留型にした。すなわち、滴下は樹冠が飽和して初めて発生し、滴下量は貯留量に比例するとした。鈴木モデルでは、 $S$  は最大貯留量 ( $S_m$ ) でもあり、貯留量が  $S$  に達した後は、すべて滴下と樹幹貯留に回わるとした。石原・小葉竹(1970)は人工降雨実験により  $S_m > S$  とし、 $S_m$  は降雨強度に比例して大きくなるとした。本モデルでは後者のモデルに近いが、実際の樹木では  $S_m$  を求めることはほぼ不可能であるので、 $S_m$  は無限大とした。

蒸発 ( $E$ ) は一降雨ごとに降雨期間中の平均蒸発強度 ( $\bar{E}$ ) を求め、ルッターモデルと同様に、 $C \geq S$  の時  $E = \bar{E}$ 、 $C < S$  の時  $E = \bar{E} (C/S)$  とした。鈴木モデルでは、貯留量 ( $C \leq S$ ) および季節に関係なく一定としている。また、ルッターモデルでは5分ごとの気象データを用い、ペンマン式で  $E$  を計算し、上のように  $S$  を基準に  $E$  を求めている。従って、本モデルはルッターモデルと鈴木モデルの中間である。

平均蒸発強度 ( $\bar{E}$ ) の推定は、各降雨において樹冠貯留がほぼ一定と考えられる時の  $\Delta(P_g - P_i)$  の時間に対する増加率をもって求めた。ここで問題となるのは、この増加率の中には樹幹流による増加率もわずかに含まれるため、 $\bar{E}$  を多少過大評価することである。鈴木モデルでは、 $E = a_i \cdot P_g / t$  と考え、実測値より平均降雨強度を求め、しゃ断量の一次回帰式 ( $I = a_i P_g + b_i$ ) の係数 ( $a_i$ ) との積として、平均値を求めている。

Canopy capacity ( $S$ ) と直達雨量への配分比 ( $p$ ) は林内雨量と林外雨量の関係から求めた。一般に使われている林内雨量と林外雨量の一次回帰

式  $P_i = a P_g + b$  における係数  $a$ 、 $b$  は Gash (1979) によると、次のような物理的意味を持つ。

$$a = 1 - (E/P_g) \quad (2)$$

$$b = (S + \int_0^1 E(t) dt) \{1 - (E/P_g)/(1-p)\} \quad (3)$$

ここで、 $P_g$  は平均降雨強度、 $t_1$  は降雨開始から樹冠貯留が  $S$  に達するまでの時間、その他の記号は文中と同じである。

この関係において、蒸発が無視できるような降雨、すなわち半時間にかんりの雨が降る場合、あるいは蒸発がないと仮定した場合、 $a=1$ 、 $b=S$  と考えられるので、傾きが1あるいは1に近い直線で、かつほぼ全部のデータを覆うような回帰式の切片をもって  $S$  と考えられる。

また、 $p$  は滴下がほとんど起らない小雨 (2mm 以下) のデータを使い、 $P_i = p P_g$  となると考え、 $p$  を決定する。

### III パラメータの決定とシミュレーション

個々のパラメータは前章に述べた方法で決定した。

$S$  の値は回帰直線の切片によって求めたが、直線の求め方により 1.04~1.64 の値を得たが、ここでは  $S=1.25$  とした。この値は9月13日に記録された10分間に6mmの強雨のときの林内雨量(ポット50個の平均)が4.8mmであり、その差1.2mmにも近く、妥当な値と考えられる。また、村井(1970)の1.44にも近いものである。

直達雨量への割合 ( $p$ ) は、2mm以下の小雨より  $p=0.25$  と決定した。すなわち、No.1地点の上空は75%程度のうっ閉度と考えてよい。この値は気球からの赤外写真により求めた林分全体のうっ閉度約80% (市川ほか, 1983) や大櫛ほか(1981) が近くの松林で求めた約77%とほぼ一致するものである。

これらの  $S$  と  $p$  の値は期間中一定とした。

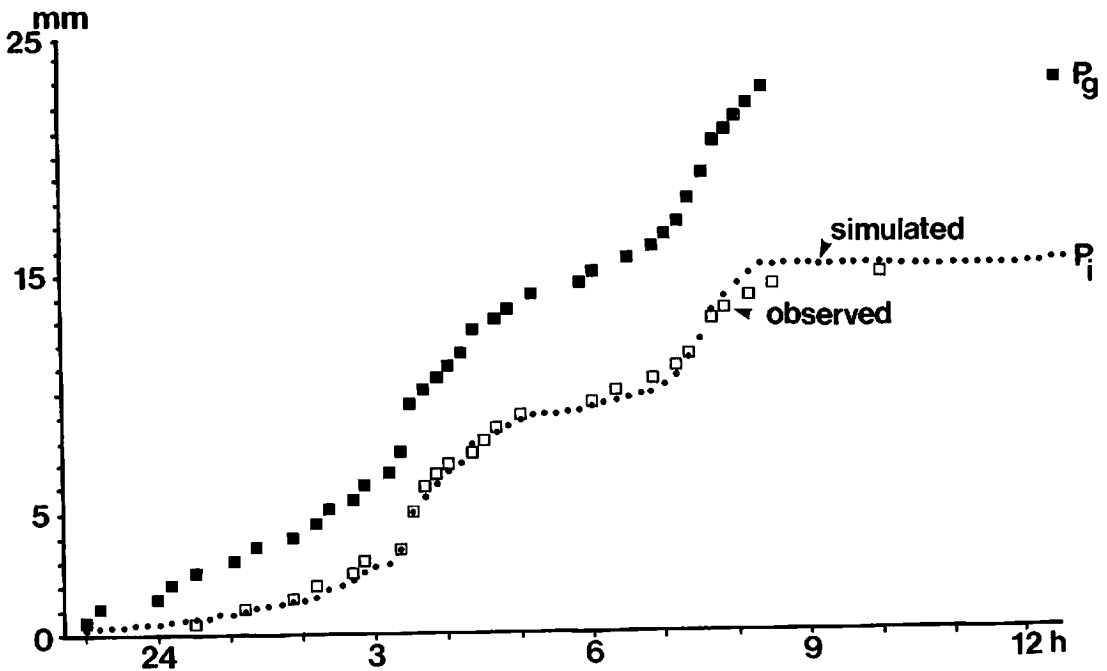
降雨中 (10時間以内の降雨停止期も含む) の平均蒸発強度は、各降雨ごとに  $\Delta(P_g - P_i)$  の時間に対する平均増加率をもって求めたが、観測地点

第1表 代表的な8降雨の降雨特性

	$P_g$ mm	$P_i$ mm	降雨時間* 時間分	最大降雨強度 mm/10分	mm/hr	$P_g$ mm/10分	$E$ mm/10分
8月25日	5.0	3.0	15:00	1.0	2.5	0.12	0.030
9月11~13日	22.0	13.5	26:10	1.0	4.5	0.41	0.120
9月19~20日	23.0	15.0	9:30	2.0	5.0	0.39	0.110
9月25~26日	29.0	22.5	35:50	1.5	4.0	0.35	0.035
10月1~2日	44.0	28.5	32:30	2.0	5.0	0.27	0.090
10月29日	7.0	5.3	5:00	1.0	4.5	0.67	0.070
11月2日	12.0	8.0	8:50	1.0	3.0	0.41	0.060
11月5~7日	15.5	10.5	38:40	1.0	2.0	0.21	0.035

\* 降雨開始より降雨終了までの時間、ただし10時間以内の降雨停止時間も含む

\*\*  $P_g$ /降雨時間でなく、 $S$ に達した後の平均降雨強度



第4図 観測値と計算値の比較 (1981年9月19~20日の一例)

での平均蒸発強度は 0.03~0.12 mm/10分 (0.18~0.72 mm/hr) となり、鈴木ほか (1979) の 0.04~0.28 mm/hr や Gash et al. (1980) の 0.08~0.72 mm/hr と同等であり、本林分の葉面積指数を考えると妥当な値と考えられる。第1表に各降雨時の平均蒸発強度を示したが、8月25日、9月25~26日、11月5~7日を除くと9月から11月にかけて、蒸発強度が低下している。蒸発強度が低い8月25日などに共通することは、降雨強度が小さ

いことである。

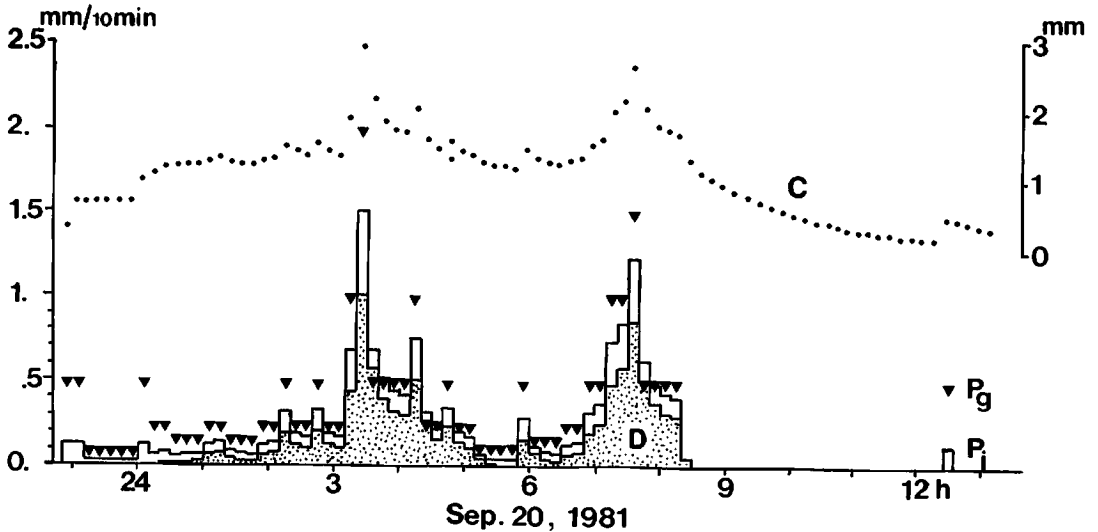
これらのパラメータを使用し、試考錯誤的に代表的な8回の降雨(第1表)を使い、タンク流出孔の滴下係数を決定した。すなわち、入力として10分ごとの林外雨量を与え、計算された林内雨量の総量と実測値を比較して、滴下係数を0.6と決定した。第4図は計算値と実測値を比較した一例であるが、モデルは林内雨量およびその増加傾向を非常にうまく再現している。第2表に 5~44

第2表 同定およびシミュレーション結果\*

	観測値	観測値	$E$ mm/10	$P_i'$ mm	シミュレーション値			
	$P_g$ mm	$P_i$ mm			$Tl$ mm	$D$ mm	$E$ mm	$C_{max}$ mm
8月25日	5.0	3.0	0.030	2.2	1.3	0.9	2.8	1.67
9月11~13日	22.0	13.5	0.120	13.9	5.5	8.4	8.1	2.54
9月19~20日	23.0	15.0	0.110	15.5	5.8	9.7	7.5	2.92
9月25~26日	29.0	22.5	0.035	22.3	7.2	15.1	6.7	2.52
10月1~2日	44.0	28.5	0.090	28.9	11.0	17.9	15.1	3.01
10月29日	7.0	5.0	0.070	4.7	1.8	2.9	2.3	2.35
11月2日	12.0	8.0	0.060	7.9	3.0	4.9	4.1	1.99
11月5~7日	15.0	10.5	0.035	10.5	3.9	6.3	5.3	1.99

\*  $S=1.25$ ,  $\rho=0.25$ , 滴下係数 0.6

\*\*最大樹冠貯留量



第5図 林外雨量 ( $P_g$ )、林内雨量 ( $P_i$ )、滴下量 ( $D$ )、樹冠貯留量 ( $C$ ) のシミュレーションの一例

mm の8降雨に対する同定結果を示してあるが、観測値と計算値の差は  $\pm 0.8\text{mm}$  以下となり、各降雨についてもかなりよく一致しており、モデルを作成するときに考えた過程が現象をほぼ正しく表わしていると考えられる。ただし、8月25日のように小雨で降雨時間が長い場合には、雨量強度、蒸発強度ともに推定しにくいため再現性が悪いようである。

また、この8降雨における林内雨量と林外雨量の直線回帰式は、実測値については、

$$P_i = 0.671 P_g + 0.032 \quad (r=0.988) \quad (5)$$

であるが、計算値については、

$$P_i' = 0.696 P_g - 0.498 \quad (r=0.991) \quad (6)$$

となり、計算値を用いた方がよりよい関係となった。この点もモデルの妥当性を支持しているものと考えられる。

以上のモデルにより、樹冠貯留量、滴下量、蒸発量の時間変化や収支を検討し、さらに仮想降雨によりモデルの特性について若干吟味した。

第5図に9月19~20日のシミュレーション結果を一例として示した。一般に樹冠貯留量は林外降雨に対して鋭く応答し、滴下によって速やかに失

なわれる。滴下は貯留量が $S$ に達した後は、貯留量に対し鋭く応答し、強い雨が連続した時には、林内降雨の大半を占める。また、高降雨強度直後には林外雨量よりも林内雨量が多くなることがあるが、その遅れはせいぜい20分までである。

第2表には、先の8降雨に対するシミュレーション結果も示してある。林内雨量は林外雨量の40～77%（荷重平均67%）であった。直達雨量はモデル条件により常に林外雨量の25%であるので、滴下量は18～52%（荷重平均42%）となる。従って、しゃ断量は23～56%（荷重平均33%）となった。各降雨での配分は8月25日と9月25～26日の降雨を除くとほぼ一定となる。蒸発強度が弱くとも、必ずしも蒸発量の割合が小さくなるとは限らないようで、やはり雨の降り方が重要な因子と言えそうである。

8降雨でのシミュレーション結果では、樹冠貯留量の最大は3.01mmで、この降雨強度は2mm/10分であった。このように高降雨強度の場合、モデルの性格上、貯留量も多くなる。 $S=1.25$ ,  $E=0.11\text{mm}/10\text{分}$ ,  $p=0.25$ で、10mm/10分の一定降雨を与えると、貯留量は13.67mmにもなる。しかし、降雨が終了すると30分以内に $S$ 以下に減少する。このことは、1時間単位のシミュレーションでは、 $S=S_m$ としてよいことを意味するものと考えられる。

## VI おわりに

今回のモデルは一降雨ごとの林内雨量を非常によく再現できることが示され、モデルを作成するための仮定がほぼ正しいことが示されたと考えられる。しかし、樹幹流の導入、パラメータの決定法、林分全体への拡張など今後さらに検討しなければならない問題点も多く残っている。

収支計算は10分間隔で行なったが、パラメータ等の推定方法からみると、10分間隔で行なう必要はなく、1時間間隔が妥当と考えられる。また、年間を通じてシミュレーションを行ない、しゃ断量の評価を行なうためのデータ入手の可能性（当地の場合、水理実験センターで1時間単位の降雨

データが得られる）からも、1時間単位がより適切と考えられる。このための $E$ の季節変動の推定も重要な問題となる。

今回のモデルのパラメータ決定においては、林内雨量と林外雨量の間の直線関係が大きな基本となっている。また、最初に紹介した他のモデルもしかりである。現在他によい方法がないので仕方ないのかもしれないが、この直線回帰式の偏重は筆者には少々気になる。この直線回帰式の問題点については別の機会に述べてみたいと考えている。

## 謝 辞

本研究には、昭和55・56・57年度文部省科学研究費一般研究（B）（課題番号：546205；代表者：高山茂美）の補助を受けた。記して謝意を表する。

## 文 献

- 石原安雄・小葉竹重機(1970)：雨水流出現象における初期貯留量について一樹木による降雨遮断一。京大防災研年報，13B，69～81。
- 市川 当・田瀬則雄・出口賢二(1983)：気球による簡易空中写真撮影について。筑波大学環境科学研究科研究報告，No.1，7～12。
- 大嶺政行・及川武久・森川靖(1981)：平地アカマツ林の熱収支・水収支特性について。「環境科学」特別研究報告集，B93-R12-2，15～35。
- 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、樹幹流下量、遮断の研究（II）遮断量の解析。日林誌，61，391～398。
- 田瀬則雄(1983)：降雨・流出過程における樹林の役割。Miscel. Publ., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba, No. 1, 6～13。
- 中野秀章(1976)：『森林水文学』共立出版，55～72。
- 間島政紀・田瀬則雄(1982)：アカマツ林内の降雨量の空間的分布について。筑波大学水理実験センター報告，6，75～82。
- 村井 宏(1970)：森林植生による降水の遮断についての研究。林試研究報告，232，225～64。
- Gash, J. H. C. (1979)：An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart. J. R. Met.*

- Soc.*, **105**, 43-55.
- Gash, J. H. C. and Morton, A. J. (1978) : An Application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *J. Hydrol.*, **38**, 49-58.
- Gash, J. H. C., Wright, I. R. and Lloyd, C. R. (1980) : Comparative estimates of inteception loss from three coniferous forests in Great Britain. *J. Hydrol.*, **48**, 89-105.
- Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Ropins, P. C. and Morton, A. J. (1971) : A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of corsican pine. *Agric. Meteorol.*, **9**, 367-384.