

ヒノキ林における林内雨量の推定

近 嵐 弘 栄⁽¹⁾・服 部 重 昭⁽²⁾

Hiroei CHIKARASHI and Shigeaki HATTORI: Estimation of the Net Rainfall in a Hinoki Stand

要 旨：樹冠の降雨遮断現象により、降雨の一部が消失し、残りが樹冠通過雨量、樹幹流下量として、林地の地表面に到達する過程を、ヒノキ人工林における観測データを用いて時系列的に解析した。樹冠による降雨の遮断現象は、雨水の一時的な保留と放出の過程とみなしうるから、遮断量は、降雨継続時間によって指数関数的に減衰するものとみなし、初期遮断能、減衰係数、最終遮断能を検討した。その結果、減衰曲線は、降雨強度別に求めることが明らかとなった。その場合、初期遮断能は、樹冠のうっ閉状態と降雨強度とから推定することができ、最終遮断能は降雨強度にかかわらず、常に一定値となった。減衰係数は、降雨強度の小さい場合はほぼ一定で、ある限界をこえたところで増加することが見出された。さらに、樹冠の保留雨量と遮断機能との間に一定の相関性を仮定し、降雨の中断時、または終了後における樹冠の保留雨量が指数関数的に減衰するものとみなし、遮断能の回復過程を検討した。その結果、樹冠保留雨量の減衰係数は、ほぼ一定値となることを見出され、遮断能の回復過程が明らかになった。これらの結果により、降雨資料から、有効林内雨量を時系列として推定した。この有効林内雨量は、林地の地表面に到達するには、時間的な遅滞が生ずるので、流出関数法の計算方式を適用することにより、林内雨量を時系列として推定する方法を検討した。これらの推定法により、ヒノキ人工林において林内雨量を推定した結果、実測値とほぼ良好な一致が認められた。

目 次

I はじめに	102
II 樹冠遮断現象の特性	104
1. 樹冠遮断能の減衰	105
2. 樹冠遮断能の回復	106
3. 樹冠遮断能回復係数 β	107
4. 樹冠貯留水の放出	109
III 試験地と観測方法	110
1. 試験地の概要	110
2. 観測方法	111
(1) 林外雨量	111
(2) 樹冠通過雨量、樹幹流下量	111
(3) 気温、風速、日照時間	111
IV 結果と考察	111
1. 気象概況	111
2. 平均降雨強度と遮断量	111
3. 平均降雨強度と遮断能減衰係数	113
4. 遮断能と飽和保留雨量	114
5. 樹冠保留雨量の減衰係数 β	114

6. 有効林内雨量の推定.....	116
7. 係数 λ の推定.....	116
8. 林内雨量の推定.....	116
V 要 約.....	118
引 用 文 献.....	120
Summary	122

I はじめに

森林が降雨の一部を遮断し、地表面に到達させることなく大気中に還元させる現象については、森林における特徴的な水文現象の一つとして、気象学的に、あるいは森林における水収支の一要素として、古くから研究が進められ、とくに、近年においては水資源問題との関連において、強い関心もたれるようになってきている。

森林による遮断現象の研究で古いものからみると、わが国では、1911年にはじめられた第1期治水事業の森林測候所の報告⁵⁾¹⁶⁾²²⁾²⁷⁾がある。内容でみると、はじめ森林気象研究の立場から、森林内外の降雨量の比較を中心に研究が進められたが、次第に林分における水収支機構の一部としての認識にたつようになり、季節別、林況別、地域別など、研究の範囲もほとんど現在と変わらないところまで広く網羅されるようになってきている。

ほぼ同じ時期になされた、Horton, R. E. の研究⁹⁾も、内容においては共通していると考えてよく、この段階で、研究の基本的な形ができたとの見方もできる。

その後の研究の流れとしては、おおまかな見方ではあるが、国内、国外を通じていくつかの方向がある。第1には、上述の研究を引き継ぐような形で、遮断現象の研究の範囲を上木から下層植生まで広め、林況別、季節別などに実証的にとらえるものである^{4)7)13)~15)17)20)29)30)35)}。第2には、室内実験的な方法で、樹葉の水分付着量を測定し、樹木全体の葉量との関係から遮断量を推定するか、第1のものと併行して行うものである⁴⁾¹⁰⁾³⁴⁾。

第3には、これらの成果をふまえながら、遮断現象を数式化、またはモデル化する方向である⁸⁾¹⁾³³⁾。

また、一方では、遮断現象を蒸発現象の面から主としてとらえる熱エネルギーの理論からの研究も、PENMAN, H. L.²³⁾以後進められ、計測技術の進歩もあって、その内容も広範囲に、より詳細に及ぶようになってきている^{5)16)19)21)24)~26)28)31)32)}。

これらの諸研究のうち、遮断現象を熱エネルギーの面から追求するためには、日射エネルギーを中心としたエネルギー収支の測定が必要である。また、エネルギー収支によらないで遮断現象の理論を実証するためには、林外雨量、樹冠通過雨量（滴下を含む）、樹幹流量などの水収支項の実測が必要となる。

既往の古い研究をみると、測器の未発達の関係もあり、これらの水収支項については、一降雨ごとに貯留タンクなどで測っているものが多く、自記式の記録計を用いて経時的に測定を行っているものは少ないようである。また、比較的新しいものについても、一部を除いては同じような傾向がみられ、観測結果を解析するに当たっては、一降雨ごと、あるいは、月、年など、比較的長い時間単位によって論じられており、1時間またはそれ以下の短い時間を単位として解析されたものはきわめて少ない。

ところで、森林の遮断現象は、水循環からみて、二つの主だった機能によって成り立っているとみなすことができる。すなわち、第1には、最大の特徴である雨水の蒸発による大気中への還元機能であり、第

2には、雨水の一時的な貯留による、林地表面への到達時間の遅延機能である。

一降雨ごと、あるいは、日、月雨量などの水収支から遮断現象をとらえる場合には、第2の雨水の遅延機能はごく短い時間においてみられる現象であるため、それらの期間内に消去されてしまい、検討の対象とはなりにくい。

最近、山地小流域における流出解析が多く行われるようになってきているが、山地の小流域では、降雨、流出の応答時間が短く、とくに、洪水流出について、森林の遮断機能を解析に組み入れようとすれば、従来より短い時間単位によって、時系列的に遮断現象の解析を行うことが必要となり、また、遮断現象を動的に数量的にとらえるためにも、そうした解析手法の検討が必要とされる。

本研究は、上記の目的から、ヒノキ人工林における各水収支項の自記記録計による観測データを用いて、樹冠遮断現象の解析を行い、遮断機能の減衰および回復、ならびに、それらと樹冠の水保留機能との関係から、林外雨量の一部が遮断量となって消失し、その他が樹冠通過雨量、樹幹流量として林地表面に到達する過程を、短い時間単位のもとに時系列的に推定する方法を提案したものである。

樹冠遮断量の時系列的な推定の最近のモデルとしては、鈴木ら²¹⁾のタンクモデルがあるが、本研究で提案したモデルは、樹冠の水保留機能を中心とした数式的なモデルであることにその特徴があり、観測器械の精度などをかん案すれば、モデルによる計算値と、実測値との間には、ほぼ良好な一致が得られたものと考えられる。

なお、本研究は、農林水産省の大型別枠研究「農林水産業における自然エネルギーの効率的利用技術に関する総合研究」の一環として実施されたもので、一部は、第93回日本林学会大会論文集に掲載済みであり²⁾、この論文は、文献番号 GEP 82-3-2-23 であることを記して、関係各位に厚く御礼申しあげる。

記号説明

本論文中に使用している記号を示すと下記ようになる。ただし、いくつかのものは、例外的に本文中で説明している。

A	林分面積	area of forest
a	直達雨量率	direct rainfall ratio
dp, dp'	$d\tau$ 時間の降雨による林内雨量	net rainfall due to short rainfall duration $d\tau$
$d\tau$	微少降雨時間	short rainfall duration
f	有効林内雨量率	effective net rainfall ratio
k	流出関数における係数	a coefficient of runoff function formula
P	林外雨量	precipitation, or gross rainfall
P_c	最終遮断能	final interception capacity
P_d	直達雨量	direct rainfall
P_f	滴下雨量	drip
P_l	樹冠遮断量	interception loss
P_i	樹冠遮断能	interception capacity
P_n	林内雨量	net rainfall
P_{nf}	林内雨量	(mm/20min) net rainfall
P_s	樹幹流量	stemflow

P_T	樹冠通過雨量	throughfall
P_0	初期遮断能	initial interception capacity
r	降雨強度	rainfall intensity
r_a	平均降雨強度	average rainfall intensity
r_e	有効林内雨量	effective net rainfall
t	時間	time
W_i	樹冠保留雨量	interception storage
W_s	樹冠の飽和保留雨量	saturated interception storage
α	遮断能減衰係数	extinction coefficient of interception capacity
β	樹冠保留雨量の減衰係数	extinction coefficient of interception storage
λ	流出関数式における係数	a coefficient of runoff function formula
τ	時間	time
ΣP_i	樹冠遮断量	interception loss = P_I

II 樹冠遮断現象の特性

樹冠遮断現象をモデルとしてみると、Fig. 1 のようになる。

ここで、林外雨量を P 、樹冠遮断量を P_I 、樹冠通過雨量（滴下雨量を含む）を P_T 、樹幹流下量を P_s とすれば、

$$P = P_T + P_s + P_I \quad \dots\dots\dots(1)$$

(1) 式から、

$$P_I = P - (P_T + P_s) \quad \dots\dots\dots(2)$$

$P_T + P_s$ は、林内雨量であり、一降雨ごと、あるいは、単位時間ごとの測定値が得られるので、 P_I を推定することが可能である。

P_T には、樹冠を通り抜ける直達雨量 P_d と、樹冠に接触してから落下する滴下雨量 P_f とが含まれるので、これらを分けて考えてみる。

林外雨量に対する直達雨量の率を a ($1 > a > 0$) とすれば、

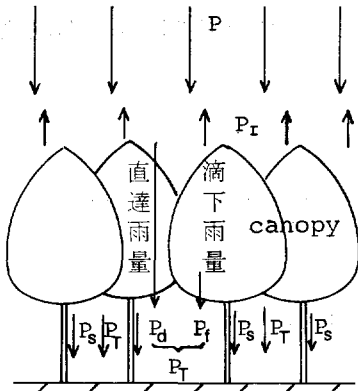
$$P_d = aP \quad \dots\dots\dots(3)$$

であるから、(2) 式から、

$$P_I = (1 - a)P - (P_f + P_s) \quad \dots\dots\dots(4)$$

と置くことができる。樹冠遮断現象に直接関係があるのは(4)式の $P_f + P_s$ で、これは、林内雨量 $P_T + P_s$ より $aP (= P_d)$ だけ少ないことになる。

次に、各数値の時間変化について考えると、直達雨量



- P : 林外雨量 Precipitation
- P_I : 樹冠遮断量 Interception
= $P - (P_T + P_s)$
- P_n : 林内雨量 Net rainfall = $P_T + P_s$
- P_T : 樹冠通過雨量 Throughfall = $P_d + P_f$
- P_s : 樹幹流下量 Stemflow
- P_d : 直達雨量 Direct rainfall
- P_f : 滴下雨量 Drip

Fig. 1. 林木による遮断現象のモデル
Rainfall interception model
in a stand.

P_a と、滴下雨量 P_f 、それに樹幹流下量 P_s とでは、降雨強度変化に対する応答の早さに差があり、はじめは P_a 、次いで P_f に変化が表れ、 P_s の発生ならびに変化はやや遅れることになる。

したがって、厳密にはこれらを分けて考える必要があるが、 P_a 、 P_f を分離して測定することは困難であり、また、 P_s は、通常、量的に少ないので、以下これらをまとめて林内雨量として扱うことにする。

1. 樹冠遮断能の減衰

樹冠遮断現象は、樹冠による雨水の一時的な貯留とその放出にかかる現象であるから、森林土壌における浸透現象と類似性を有するとみることができる。

すなわち、樹冠をある拡がりをもった水の透下層とみなせば、林内雨量が中間流出、地下水流出などに相当し、遮断量は、浸透量のうち、蒸発散などにより流出に加わらない成分に相当して、消耗現象の性質を有するとの見方である。

いま、降雨継続中において、任意時間における樹冠の遮断量を遮断能と呼ぶことにし、 P_i (mm/hr) とおけば、

$$P_i = P_c + (P - P_c)e^{-\alpha t} \dots\dots\dots (5)$$

ここで P_c : 降雨が長時間継続した場合における単位時間あたりの遮断量……最終遮断能 (mm/hr)

P_0 : 降雨開始時の単位時間あたりの遮断量……初期遮断能 (mm/hr)

α : 林況に関する係数……減衰係数

という関係が成立するものとみなすことができる。(5) 式で、 P_c 、 P_0 、 α を与えれば、任意時間 t における遮断能 P_i が求められる。

ここで、(5) 式の各因子について検討する。

P_0 は、降雨開始時における、樹冠による単位時間の降雨の捕捉量であり、樹冠が乾いている場合に最も大きいと考えられる。林分の直達雨量率を a とし、降雨強度 r_{01} が継続するものとすれば、樹冠の捕捉雨量は、樹冠が乾いていれば、Fig. 2 に示すように、はじめは $(1-a)r_{01}$ となり、時間の経過とともに減少し、ほぼ一定値 P_c に近づくものと考えられる。降雨強度が r_{03} 、 r_{08} と大きい場合でも、ごく初めのうちは、捕捉雨量は $(1-a)r_{03}$ 、

$(1-a)r_{08}$ で、時間の経過とともに急激に減少し、やはり一定値 P_c に近づくものと考えられる。

樹冠が前の降雨などで湿っていれば、降雨開始時の樹冠の遮断能は小さくなるものとみられる。したがって、遮断能 P_i の最大値は、樹冠の乾いている場合に生じ、Fig. 2 における P_{01} 、 P_{02} 、 P_{03} などに相当することになる。

各降雨ごとの P_0 は、実用的な方法として、降雨を単純化し、平

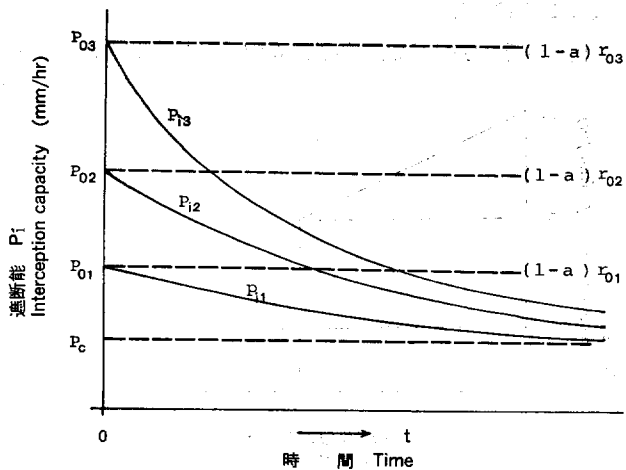


Fig. 2. 降雨強度別遮断能の時間変化
Variation of interception capacity in each rainfall intensity by elapsed time.

均降雨強度 r_a を求め、 $P_0 = (1 - a)r_a$ とおくことにした。

P_0 , α は、直接的に求められないので、(5) 式を時間 t について積分し、

$$\Sigma P_i = P_0 t + \frac{P_0 - P_c}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

とおき、 ΣP_i が (4) 式の P_I に相当することから、統計学的に推定する。

ΣP_i は、実測データでは、普通、一降雨ごとに得られるが、一降雨中には必ず降雨の強弱部分を含むので、齊一な降雨強度に基づくデータは得にくい。一方、降雨強度と遮断量、樹冠通過雨量などの水収支各項とは線形関係にはないとみられるので、厳密に言えば、平均降雨強度に基づく統計処理結果を、そのまま同値の齊一降雨強度に適用することには問題が残る。しかし、この場合は、樹冠遮断現象のモデル化過程における一つの仮定として用いたものであり、やむをえないものとする。時間単位を 20 分などと短くとれば、一降雨中の区分数も多くなり、誤差も相殺されるものと判断される。

2. 樹冠遮断能の回復

遮断能の減衰過程に次いで、遮断能の回復過程について検討する。

降雨中断、またはごく弱い降雨の場合においては、遮断能は逆に回復するか、あるいは変化がないと考えられる。その場合の遮断能と樹冠の保留雨量との関係、ならびに樹冠保留雨量の時間的変化の推定の二つの面から考えてみる。ここで、保留雨量は、降雨中に樹体に付着した水量で、降雨中、および降雨後は蒸発量となり、樹冠遮断量となるもので、その最大値が飽和保留雨量となる。

樹冠遮断能と樹冠保留雨量との関係は、まだ明らかにされたものが見当たらないが、浸透能と土壌の含水比については、実用的には線形関係にあるとした研究例¹¹⁾¹²⁾¹⁸⁾もあり、モデル化における一方法として、この場合も、一応、線形とおいて推論を進める。

Fig. 3 に示すごとく、樹冠の飽和保留雨量を W_s (mm) とすれば、保留雨量 W_i における遮断能 P_i は、

$$P_i = P_c + \frac{(P_0 - P_c)}{W_s} (W_s - W_i) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで $W_s > W_i > 0$

降雨の中断、あるいは降雨終了後においては、樹冠の保留雨量は蒸発により、時間の経過にしたがって

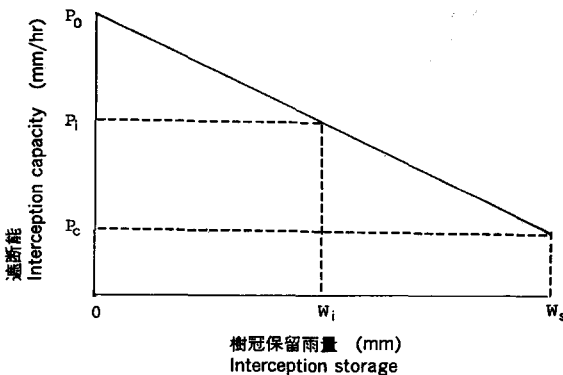


Fig. 3. 樹冠保留雨量と遮断能との関係
Relation between interception storage and interception capacity.

指数関数的に減衰するものとみなしうることは、石原ら¹⁰⁾の実験でも明らかにされているとおりである。 W_i は、長時間のあとには 0 に近づくから、

$$W_i = W_{i0} e^{-\beta t} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 W_{i0} : 樹冠保留雨量の初期値

β : 樹冠保留雨量の減衰係数

と置くことができる。

(7) 式に (8) 式を代入すると、

$$P_i = P_0 - \frac{P_0 - P_c}{W_s} W_{i0} e^{-\beta t} \dots\dots\dots (9)$$

となり、樹冠遮断能の回復曲線が得られる。

(9) 式で、 P_c は一定であるが、 P_0 は降雨強度により変化するから、回復曲線が降雨強度ごとに画かれることになるが、この P_i は、次の降雨開始時点の遮断能に当たるから、その降雨強度に基づいて、回復曲線の計算を行えばよい。

この β の値は、風、気温などの気象条件に影響されると考えられるが、この値を直接求めることは困難で、前述の、降雨継続中における樹冠遮断能の減衰過程を合わせて、一降雨ごとに間接的に推定することが必要となる。

3. 樹冠遮断能の回復係数 β

Fig. 4-(a) で、樹冠保留雨量が W_{i1} である場合、(7) 式から遮断能は、

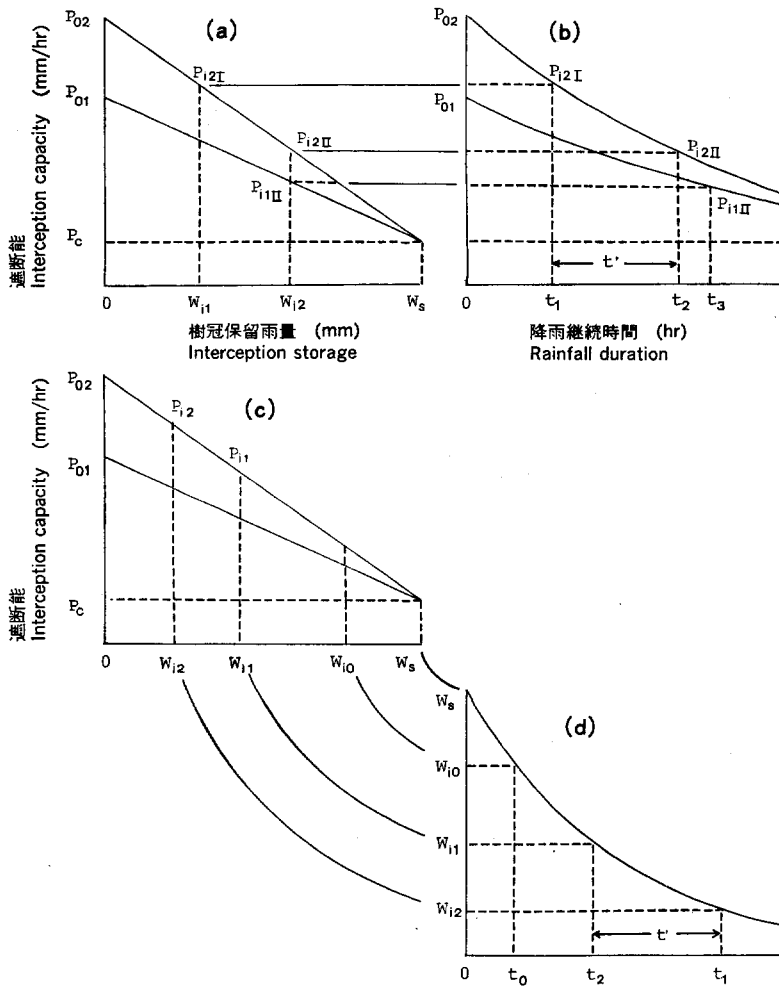


Fig. 4. 樹冠保留雨量，降雨継続時間ならびに遮断能の関係
Relation between interception storage, rainfall duration and interception capacity.

$$P_{i2I} = P_c + \frac{(P_{02} - P_c)}{W_s} (W_s - W_{i1}) \dots\dots\dots(10)$$

となる。次に、遮断能が P_{i2I} であるときは、Fig. 4-(b) でみるように、初期遮断能が P_{02} で時間が t_1 だけ経過した状態に当たるから、(5) 式で $t = t_1$, $P_0 = P_{02}$, $P_t = P_{i2I}$ において、

$$t_1 = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{P_{i2I} - P_c}{P_{02} - P_c} \dots\dots\dots(11)$$

t_1 から t' 時間経過して t_2 となったとして、その場合の遮断能を P_{i2II} とすれば、(5) 式から同様に、

$$P_{i2II} = P_c + (P_{02} - P_c) e^{-\alpha t_2} \dots\dots\dots(12)$$

Fig. 4-(a) 図で、遮断能 P_{i2II} のときの樹冠保留雨量を W_{i2} とすれば、(7) 式で、 $P_t = P_{i2II}$, $P_0 = P_{02}$ において、

$$W_{i2} = W_s \left(1 - \frac{P_{i2II} - P_c}{P_{02} - P_c} \right) \dots\dots\dots(13)$$

となり、結果として、降雨が t' 時間続いたことにより、樹冠遮断能が P_{i2I} から P_{i2II} へ減少し、樹冠保留量は逆に、 W_{i1} から W_{i2} へ増加したことになる。

この関係は、初期遮断能が P_{01} の場合においても同様に成立すると考えられる。もし、降雨強度が途中で変わったとした場合は、その場合の樹冠保留雨量と、その変わった降雨強度に見合う初期遮断能 P_{01} とから、(10) 式と同様に遮断能 P_{i1II} を求めることができる。

すなわち、Fig. 4-(a) で、 W_{i2} で、降雨強度が変化したとして、

$$P_{i1II} = P_c + \frac{P_{01} - P_c}{W_s} (W_s - W_{i2}) \dots\dots\dots(14)$$

この P_{i1II} は、Fig. 4-(b) で、初期遮断能 P_{01} の減衰曲線上で時間 t_3 に当たり、(11) 式と同様に、

$$t_3 = -\frac{1}{\alpha} \ln \frac{P_{i1II} - P_c}{P_{01} - P_c} \dots\dots\dots(15)$$

となり、降雨強度の変化に応じた樹冠保留雨量、遮断能、降雨継続時間相互の関係が推定できる。

次に、遮断能の回復過程であるが、いま、Fig. 4-(d) で、樹冠保留雨量を W_{i1} とする。

これは、保留雨量 W_{i0} から $t_2 - t_0$ 時間経過した状態に当たり、(8) 式で $W_t = W_{i1}$, $t = t_2 - t_0$ とおけば、

$$t_2 - t_0 = -\frac{1}{\beta} \ln \frac{W_{i1}}{W_{i0}} \dots\dots\dots(16)$$

となる。降雨が止んで t' 時間経過し、 t_1 になったとすると、その場合の樹冠保留雨量は、同様に、(8) 式で $W_t = W_{i2}$, $t = t_1 - t_0$ において、

$$W_{i2} = W_{i0} e^{-\beta(t_1 - t_0)} \dots\dots\dots(17)$$

となる。

すなわち、降雨中断時間と、樹冠保留雨量の減少との関係が推定できることになる。樹冠遮断能と樹冠保留雨量との関係については、Fig. 4-(c) のように、降雨継続中における遮断能の減衰の場合と同様に算定が可能である。

(16), (17) 式の β は、一応既知のものとして説明したが、これは、(8), (9) 式で用いた β についての説明のように、直接的に求める方法がない。そこで、一つの方法として、降雨中断期間を含む降雨について、林外雨量の時系列により、(10) 式から (17) までの一連の計算を、 β の仮定値に基づいて行い、樹冠遮断量を推定し、実測した林内雨量に基づいて (2) 式により計算した実測遮断量との比較か

ら、 β の最適値を求める方法を用いてみる。

以上により、降雨継続中における樹冠遮断能の減衰過程と回復過程、降雨開始時における樹冠の保留雨量がわかれば、林外雨量の時系列から樹冠遮断量が時系列的に推定でき、その結果、林内雨量となる水量も計算できることになる。

しかしながら、林外雨量から遮断量を差し引いた値は、直ちに林内雨量の時系列にはならない。その理由は、樹体の雨水貯留機能による放出の時間的な遅れがあるためであり、したがって、ここでは林外雨量から遮断量を差し引いた値、すなわち、時間的な遅れを生じる以前の雨水量を有効林内雨量 r_e とし、そこへ時間の遅れを考慮して、林内雨量の時系列を推定する。

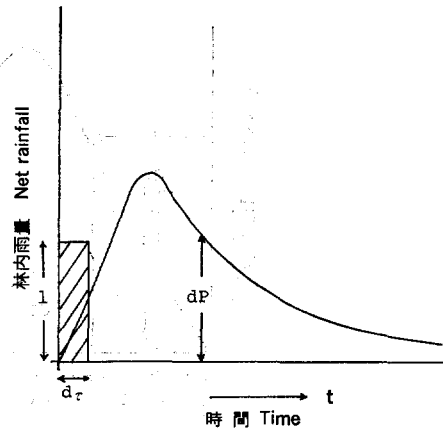


Fig. 5. d_r の降雨による林内雨量
Net rainfall by precipitation d_r .

4. 樹冠貯留水の放出

樹冠が雨水を貯留し、放出する過程は、滴下、あるいは樹幹流下などであり、詳細にみればかなり複雑なものであるが、本研究では、これを比較的簡単なモデルで表現し、そこに法則性を見出すことを主目的とし、流出関数の考え方を適用してみることにした。

流出関数は、単位図の解析が便利のように関数として表現したものであるが、流域における貯留機能を、樹冠の貯留機能におきかえることにより、同様な計算ができると考えられる。

いま、林分面積を A 、雨量強度を 1 とし、降雨時間が d_r とした場合の林内雨量が次式で表されるものとする (Fig. 5)。

$$dP = Akt e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (18)$$

k, λ : 係数

林外雨量に対する有効林内雨量の比を f とすれば、

$$f \cdot A \cdot 1 \cdot d_r = \int_0^{\infty} dP dt = Ak \frac{1}{\lambda^2}$$

$$k = f \lambda^2 d_r \dots\dots\dots (19)$$

(19) 式を (18) 式へ代入し、 A を 1 とおき、降雨強度を mm/20 min、 dP を mm/sec とすれば、

$$dP = \frac{1}{1200} f \lambda^2 t e^{-\lambda t} d_r \dots\dots\dots (20)$$

となる。

いま、 r (mm/20 min) の降雨が t_0 時間降ったとすれば、この雨による林内雨量の時間変化は、Fig. 6 のように、 d_r 時間の降雨による林内雨量 dP' の合成されたものとなり、

$$dP' = \frac{f r}{1200} \lambda^2 (t - \tau) e^{-\lambda(t-\tau)} d_r \dots\dots\dots (21)$$

であり、合成値 P_n (mm/sec) は、 $0 < t < t_0$ に対して、

$$P_n = \int_0^t dP' d\tau = \frac{f r}{1200} \left\{ 1 - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$t \geq t_0$ に対して、

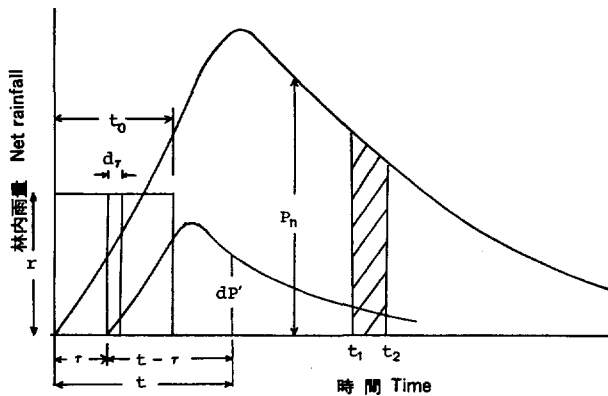


Fig. 6. 林内雨量の合成
Estimation of net rainfall.

$$P_n = \int_0^{t_0} dP' d\tau = \frac{f \cdot r}{1200} \left\{ e^{-\lambda t'} (\lambda t' + 1) - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} \dots\dots\dots (23)$$

$t' = t - t_0$

となる。

P_n を、20分間の降雨強度 P_{nf} (mm/20 min) におきかえ、Fig. 6 のように $t_1 \sim t_2$ 間の面積を求めると、

$0 < t < t_0$ で、

$$\sum_{t-t_1}^{t_2} P_{nf} = \int_{t_1}^{t_2} f \cdot r \left\{ 1 - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} dt \dots\dots\dots (24)$$

$t \geq t_0$ で、

$$\sum_{t-t_1}^{t_2} P_{nf} = \int_{t_1}^{t_2} f \cdot r \left\{ e^{-\lambda t'} (\lambda t' + 1) - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} dt \dots\dots\dots (25)$$

$t' = t - t_0$

$f \cdot r$ は有効林内雨量とみなしてよいから、(24)、(25) 式によって、その時間分配率が計算できる。この時間分配率は、 λ によって決められることになるが、 λ が林況条件によって定まるものとすれば、(24)、(25) 式によって、林内雨量の時系列を係数化できることになる。

この λ を実際の林分で求めるため、実測された林外雨量のうち、比較的降雨時間が短く、降雨強度の大きい部分の含まれる降雨について、コリンズの用いた逐次修正法⁹⁾ によって、林内雨量の時間分配率を求め、 $\sum P_{nf}$ の時間分配率と比較し、 λ の最適値をさがすことにした。コリンズの逐次修正法は、通常、雨量と流出量の関係について適用されるが、この場合は、実測された林内雨量を流量におきかえて計算を行ったものである。

次に、これらの計算法をヒノキ林に適用した例を示す。

III 試験地と観測方法

1. 試験地の概要

試験地は、茨城県西茨城郡岩瀬町、笠間営林署所管国有林、笠間事業区 38 林班・に小班で、29 年生の

ヒノキ人工林内に設けた。

林分面積は約 4.5 ha, 平均樹高 11 m, 平均胸高直径 16.1 cm, 材積 140 m³/ha で, 林冠疎密度は密である。林冠はほぼ完全に閉鎖しているので, 林内の下層植生はごく少なく, ヒサカキ, クロモジ, リョウブ, ヤマツツジ, コミネカエデなどが点在する。

林分の標高は 250~350 m で, 調査対象試験区の中心は 270 m である。傾斜は林分下部で約 11° と緩であるが, 上部では 25° と急になる。斜面方位は N40° E である。表層地質は花崗岩で, その上に関東ロームが厚く堆積しており, 土壌は褐色森林土壌 B_a に属する。層位は A₀ 層が約 1 cm, A 層が 20~30 cm, B 層が約 60 cm で, C 層は非常に厚く堆積している。

2. 観測方法

(1) 林外雨量

林外雨量観測は, 他の気象要素とともに, 試験地の林分に隣接して設けた気象観測露場で行った。雨量計は, 口径 200 mm の普通雨量計と, 1 転倒 0.5 mm の転倒ます型の長期自記雨量計を用い, 時間雨量は普通雨量計の記録を基準として補正した。

(2) 樹冠通過雨量, 樹幹流下量

ヒノキ林分の中心部で, 平均的な立木密度, 樹冠密度とみられる場所を選び, 試験区とした。試験区の大きさは 4.5 × 6.5 m で, 6 本のヒノキが生立している。試験区内には下層植生はほとんどない。樹冠通過雨量は, 受水幅 20 cm, 長さ 512 cm の樋型雨量計 3 本を試験区内に設定して測定した。樋型雨量計内に落下した雨水は, 下端のビニールホースで自動排水装置付きの量水器に導き, 自記水位計により測定した。樋型雨量計の受水面積は, 試験区面積の約 11% に相当する。

樹幹流下量は, 試験区内の全木の地上高 1.2 m に, 鉢巻式の集水装置を取り付け, 集めた雨水をまとめて樹冠通過雨量測定の場合と同型式の自動排水装置付きの量水器に導き, 自記水位計により測定した。

当該林分は, 単純一森林であるため, 樹冠の大きさが比較的均一であり, 試験区内外における樹冠の張り出しは, 面積的に相殺されるとみなし, 樹冠流下に関連する森林の面積は, 試験区面積に等しいとみなして計算を行なった。

(3) 気温, 風速, 日照時間

測定は, 林外雨量と同様に, 隣接して設けた気象観測露場で行った。なお, これらの観測法の詳細は, 林試研報⁶⁾で報告済みである。

IV 結果と考察

1. 気象概況

観測は 1979 年 11 月にはじめられたが, そこで用いたデータは, 1980 年 1 月~12 月のものである。1980 年の気象を概観すると, Table 1 のようになる。北関東地方の特徴として, 冬期間の降雨量が少ない。夏期間については, 1980 年は冷夏といわれ, 低温で湿潤な日が多かった。

2. 平均降雨強度と遮断量

(6) 式における P_0 , α を推定するため, 降雪を除いて, 57 の降雨資料によって検討を進めた。この場合, 一降雨として区分する範囲が問題であるが, (6) 式における P_0 が最大に近いとみなせるような状態, すなわち, 樹冠が乾いた状態を基準として考えてみる。樹冠の乾き方は, 降雨が止んでからの時間

Table 1. 林地 の 気 象 概 況
 Meteorological conditions of the Hinoki stand

項目 Item	月 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年計 Total 年平均 Mean
降 雨 量 Precipitation (mm)		68.1	13.7	157.6	112.4	173.8	189.0	239.3	118.1	167.3	151.8	110.0	41.4	1,542.5
平 均 気 温 Mean air temperature (°C)		2.3	1.2	4.2	9.7	15.9	19.9	19.4	19.9	19.1	13.9	8.6	3.7	11.5
最 高 気 温 Max. air temperature (°C)		6.2	5.4	8.3	14.2	20.5	23.5	23.1	22.9	21.9	17.6	12.6	7.3	15.3
最 低 気 温 Min. air temperature (°C)		-1.5	-2.9	0.1	5.3	11.3	16.3	16.9	17.0	16.2	10.1	4.6	0.1	7.8
風 速 Wind velocity (m/sec)		1.80	1.80	1.82	2.00	2.00	1.70	1.24	1.43	1.60	1.50	1.44	1.75	1.67
日 照 時 間 Sun shine hour (hr)		6.3	8.3	6.9	7.2	8.4	7.4	6.0	6.0	5.7	6.2	6.2	5.3	6.7

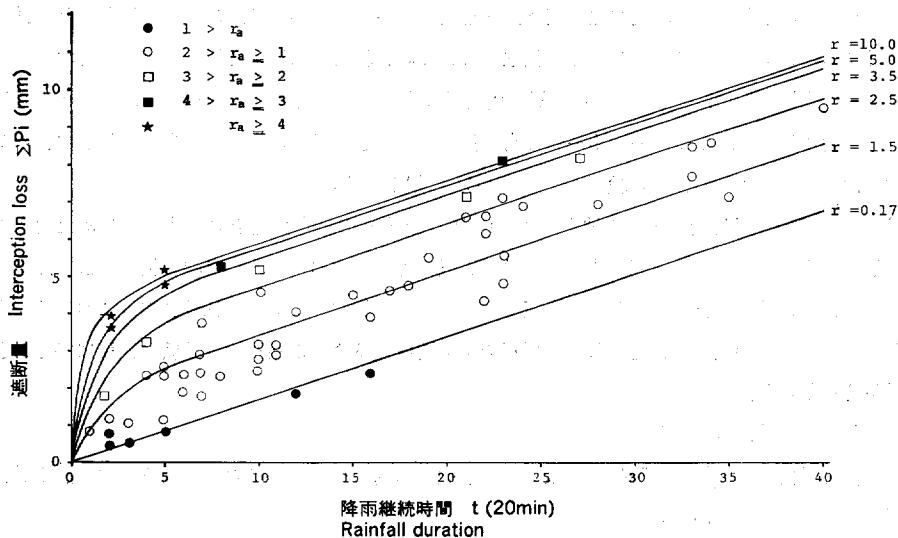


Fig. 7. 平均降雨強度別の降雨継続時間と遮断量
 Rainfall duration and interception loss in each average
 rainfall intensity.

は同じでも、気温、風速などによって異なるので、条件を決めることはなかなか難しいが、便宜的に、前降雨終了から5時間以上経過している場合を区分の目途とした。

降雨継続時間は、一降雨の降雨開始から、降雨終了までの総時間をとる場合と、降雨中断時間を除く実降雨時間をとる場合とが考えられるが、この場合は、便宜的に各区分単位時間ごとの樹冠遮断量、樹冠通過雨量などが独立していて、単純に重ね合わせができるという仮定にたって、後者、すなわち、降雨中断時間を除く実降雨時間を用いることにした。

直達雨量率は、直接的な測定法がなく、したがって、RUTTER ら⁹⁶⁾、JACKSON ら¹¹⁾の推定法に準じて推

定した結果⁶⁾に基づき、20%とおいたが、これは、季節により葉量がかなり異なることなどもあり、問題点が残されている。一降雨ごとの降雨継続時間と遮断量との関係は、Fig. 7 に平均降雨強度の階層別にマークで示したとおりである。

降雨強度 r_a が 1 mm/20 min 以下の場合については、遮断量 ΣP_t と時間 t との関係はほぼ線形となり、 $\Sigma P_t = 0.17t$ という関係が得られた。この勾配 0.17 mm/20 min が、最終遮断能 P_c に当たるものと考えられる。

また、この P_c は、降雨継続中における蒸発強度に相当するとみてよいが、この場合、降雨資料として転倒ます型の雨量計のものをを用いていることと、降雨の継続時間を 20 分ごとにみて、降雨があった場合だけを加え合せていることから、微弱な降雨が継続するような場合には、降雨継続時間が過少に計算される傾向があり、逆に P_c は過大に算出されることになる。もし、降雨量の記録により、前後の状況から判断して、転倒ますの回転は起こらない期間でも、弱い降雨が継続しているとみられる場合も含めて、降雨継続時間を算出し、この P_c を求めると、 P_c は 0.07~0.09 mm/20 min 程度となり、1 時間あたりでは、0.20~0.26 mm 程度の値となる。この転倒ます型の雨量計の記録と、(6) 式によって得られる P_c 、 α については、降雨継続時間のとり方と、計測器械に基づく問題点として、今後検討する必要がある。

3. 平均降雨強度と遮断能減衰係数

(6) 式で、 P_0 を平均降雨強度に基づいて計算し、 P_c に前記の 0.17 mm/20 min を用い、各平均降雨階層別に α の値を最少自乗法によって求めた。結果は、Fig. 8 に示すとおりで、 α の値は、平均降雨強

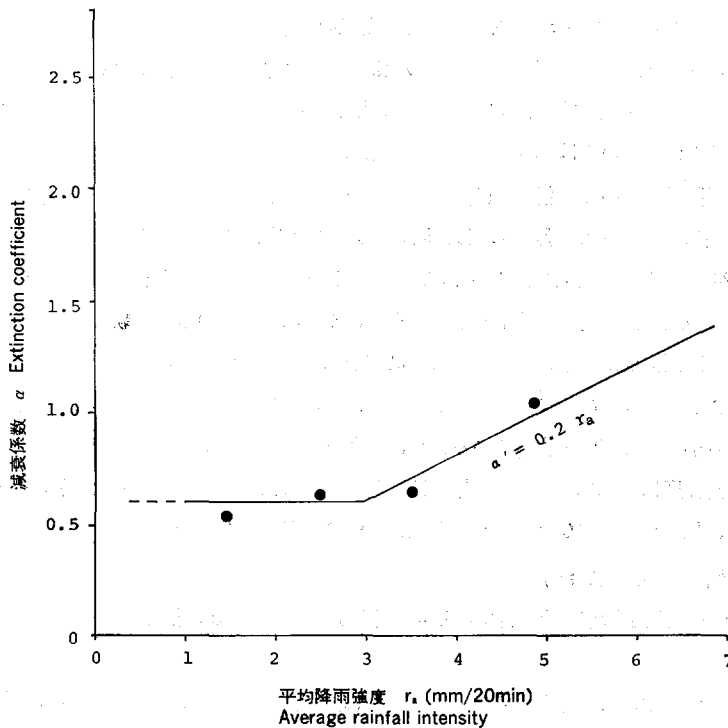


Fig. 8. 平均降雨強度と減衰係数の関係
Relation between rainfall intensity and extinction coefficient.

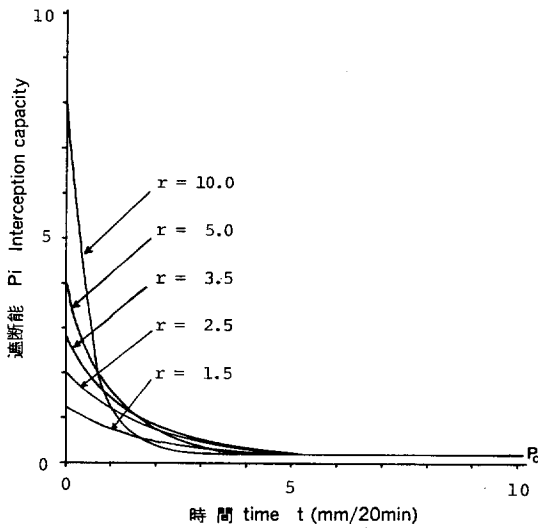


Fig. 9. 遮断能の減衰曲線
Recession curve of interception capacity.

式の計算を行い、得られた遮断能減衰曲線を Fig. 9 に示した。

Fig. 9 でみると、遮断能 P_i は、 $t=6$ 、すなわち、2時間ではほぼ一定値 P_c に到達する。前述のごとく、この P_c は、一定値のまま継続することから、蒸発強度に相当すると考えられる。

(6) 式の ΣP_i のうち、この $P_c \cdot t$ を除いた分が樹冠の保留雨量と考えられるが、Fig. 7 でみられるように、 $t=6$ あたりでその増加が止み、 ΣP_i の線は $P_c \cdot t$ の線とはほぼ平行になる。

その場合、 $P_c \cdot t$ を除く部分の最大値は 4mm 程度となっている。これらのことから、樹冠の最大保留雨量は、このヒノキ林については 4.0mm とおくことにした。

樹冠の飽和保留雨量について、藤井⁴⁾ は、ヒノキ葉を浸水させることによりその量を推定し、飽和値として 1.4mm を得ている。また、服部⁹⁾ は、同じヒノキ林の実測データから、飽和付着水分量を W_s とし、 $W_s = 1.24\text{mm}$ という結果を得ているが、これらに比べかなり大きな値となっている。

石原¹⁰⁾ は、この飽和保留雨量（貯留雨量と呼んでいる）についての室内実験で、クロマツ、ヒノキの飽和保留雨量が、降雨強度が大きい場合ほど大きな値を示すことを明らかにしているが、前記藤井の推定は、葉を浸水後に引き揚げて静的な状態で測定を行ったものであり、このことが、類似の状況を有するヒノキ林に対しても小さな推定値を表しているように考えられる。また、Fig. 7 でみられるように、一降雨ごとの平均降雨強度は 1~2mm 以下の場合が多く、これらに基づいて推定した保留雨量は、結果的には弱い降雨強度に見合うものになり、これらが服部⁹⁾ の結果を示しているというように考えられる。

5. 樹冠保留雨量の減衰係数 β

降雨資料のうち、降雨中断期間が含まれる 43 の降雨について、 β の推定値を季節別に表したものが Fig. 10 である。

推定値にかなり大きなばらつきがみられるが、これは、樹冠保留雨量がごく少ないのに対して、風、気温などの影響もあり、さらには林外雨量、林内雨量などのばらつきや、観測誤差も比較的大きいためと考えられる。すなわち、林内雨量のわずかな変化に対して、 β の推定値はかなり大きく変化するので、厳密

度が 3mm/20min 程度ではあまり変化がなく、3mm/20min をこえたところから増加する傾向がみられる。そこで、

平均降雨強度

$$r_a < 3.0 \text{ mm/20 min で } \alpha = 0.6$$

$$r_a \geq 3.0 \text{ mm/20 min で } \alpha = 0.2 r_a$$

とにおいて計算することにした。

4. 遮断能と飽和保留雨量

(6) 式の P_c に 0.17mm/20min を用い、 α は、 $r < 3.0 \text{ mm/20 min}$ で 0.6、 $r \geq 3.0 \text{ mm/20 min}$ で $0.2r$ とおき、 P_0 は各階層の降雨強度 r の値と直達雨量率とから計算した値に基づいた ΣP_i の曲線を Fig. 7 に併記した。Fig. 7 で、各曲線の各端に r の値を示した。また、同じ因子を用いて、(5)

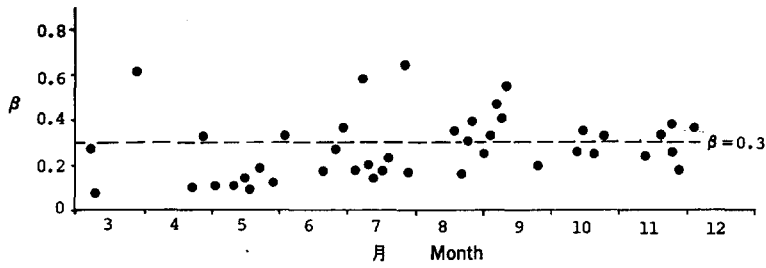


Fig. 10. 一降雨ごとの β の推定値
Estimation of β in each rainfall.

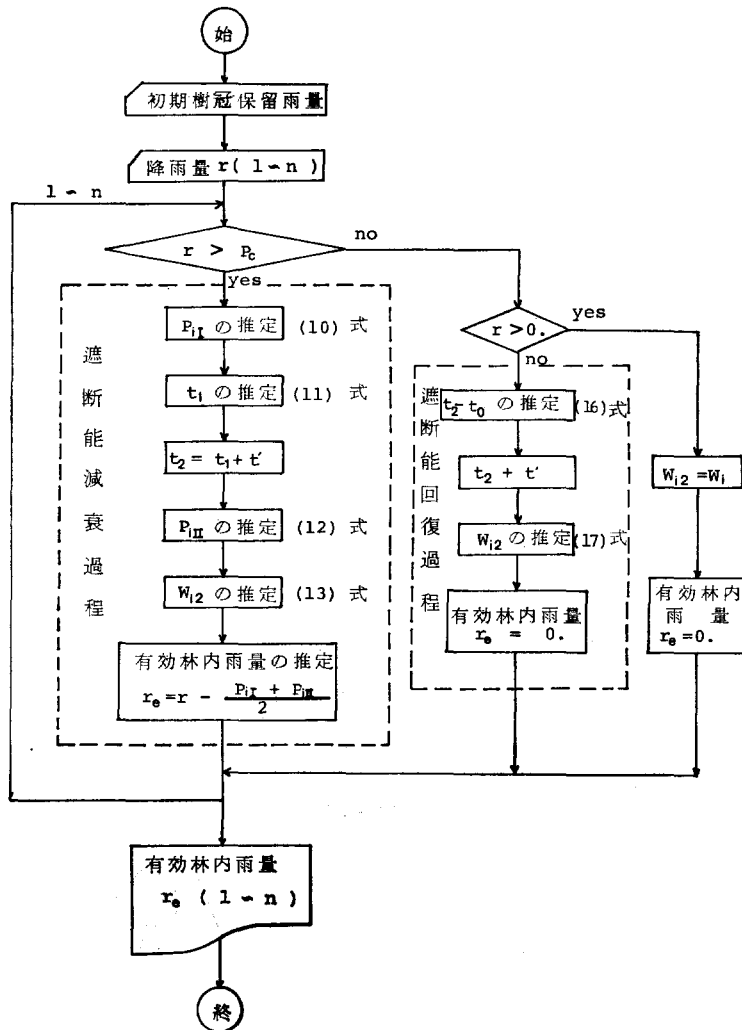


Fig. 11. 有効林内雨量の推定
Estimation of effective net rainfall.

な推定はかなり困難である。

Fig. 10 から、一応、 β は 0.3 とみなすことにしたが、そうすると、例えば経過時間が 5 時間の場合、(8) 式で $t=15$ となり、 W_t/W_{t_0} は、0.01 すなわち 1% に減少し、ほぼ乾いた状態とみなして差し支えなからう。

6. 有効林内雨量の推定

林外雨量の時系列が与えられ、最終遮断能 P_c 、飽和保留雨量 W_s 、減衰係数 α 、 β 、ならびに降雨開始時の樹冠保留雨量 W_i が与えられれば、(10) 式から (17) 式までを逐次適用して、遮断量と有効林内雨量が推定できることになるが、そのフローチャートを Fig. 11 に示す。

降雨強度が最終遮断能 P_c より大きいときは、樹冠の遮断能は減衰過程が適用され、降雨がないときは回復過程に入ることになる。

なお、降雨強度が $P_c > r > 0$ の場合は、一応、樹冠保留雨量に変化がなく、したがって、遮断能も変化がないものと仮定した。

7. 係数 λ の推定

実測された降雨の資料から、降雨継続時間が比較的短く、降雨強度の大きい期間が含まれるようなものを選び、コリンズ法によって林内雨量の時間分配率を計算したものを、Fig. 12-(a) に示す。これと、(22)、(23) 式の P_n 曲線から得られる時間 t に対する区分面積率とを比較することにより、 λ の適値が決められる。(22)、(23) 式の P_n の時間 t による分配率を、 λ の大きさ別に計算したものを Fig. 12-(b) に示す。Fig. 12-(a) と、Fig. 12-(b) との比較から、このヒノキ林については、 $\lambda=7$ 程度が適当と認められた。

8. 林内雨量の推定

前記 (1)~(7) によって、林外雨量から推定された林内雨量と、実測された林内雨量とを比較した例を、Fig. 13-(1)~(5) に示す。

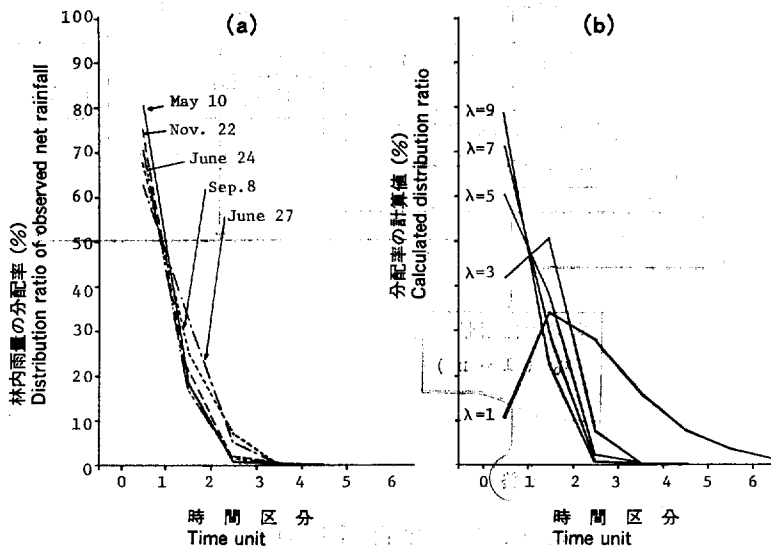
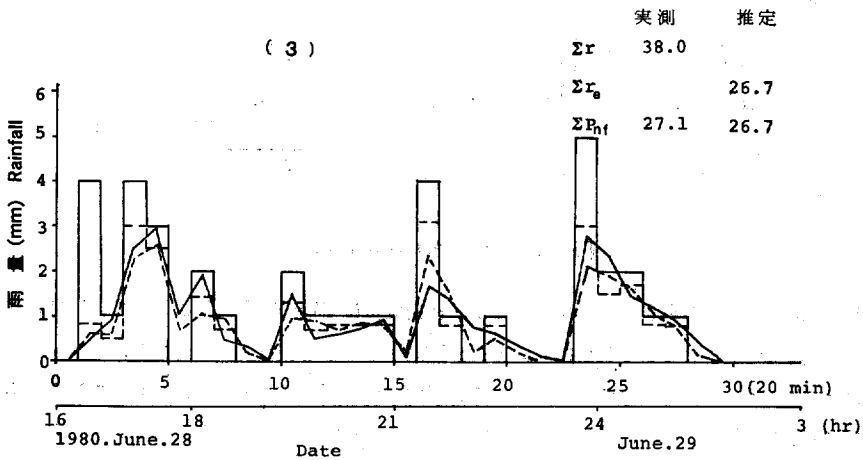
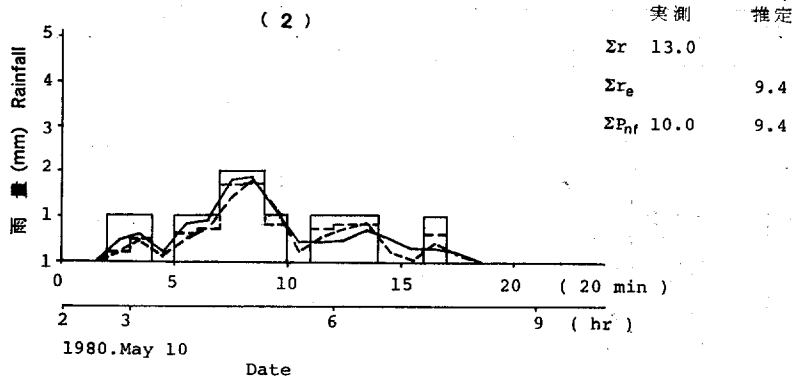
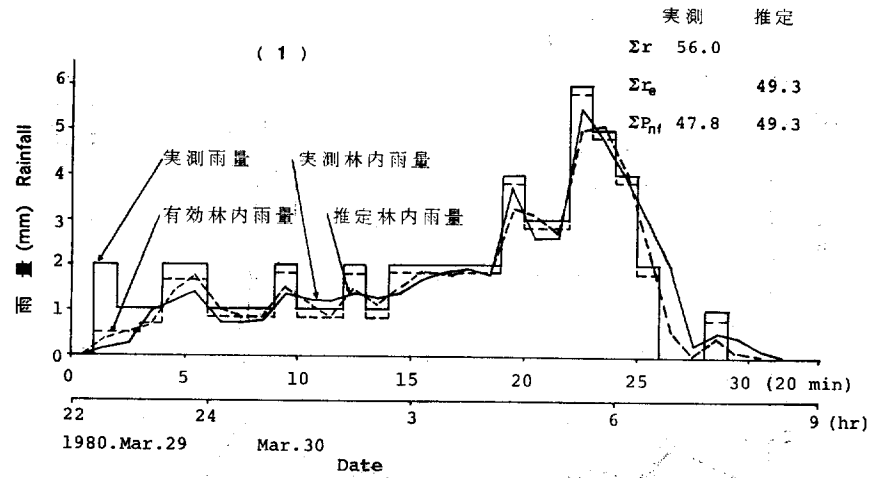


Fig. 12. 実測林内雨量分配率と計算分配率

Distribution ratio of observed net rainfall and calculated distribution ratio.



計算因子 直達雨量率: $a=0.2$
 遮断能の減衰係数: $\alpha: r < 3$ (mm/20 min) で 0.6
 $\alpha: r \geq 3$ (mm/20 min) で 0.2 r
 最終遮断能: $P_c=0.17$ (mm/20 min)
 樹冠の飽和保留雨量: $W_s=4.0$ (mm)
 樹冠保留雨量の減衰係数: $\beta=0.3$

Fig. 13. 林内雨量の観測値と推定値の比較
 Comparison of observed net rainfall with calculated value.

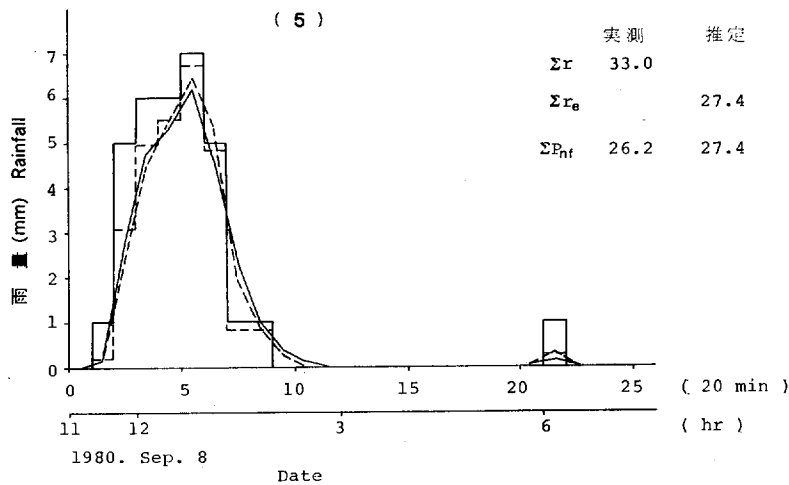
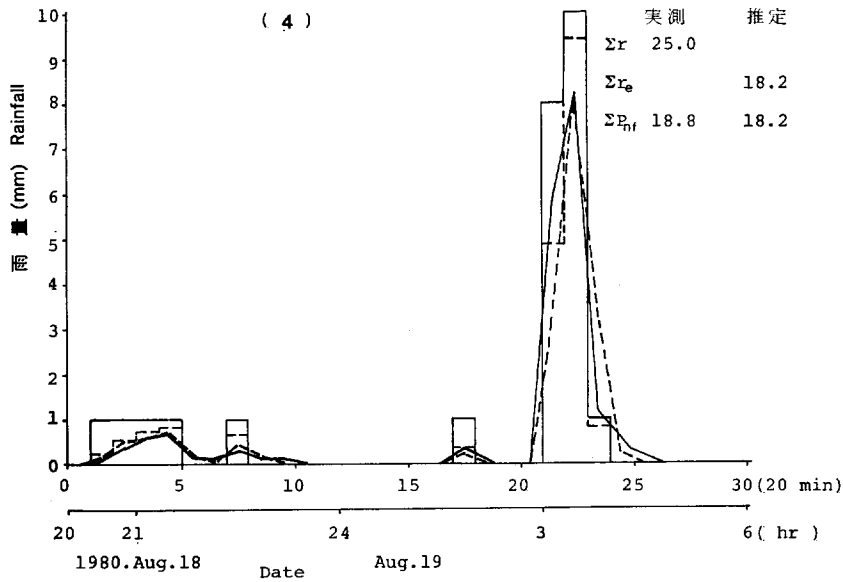


Fig. 13. (つづき) (Continued)

有効林内雨量は必ず林外雨量より少なくなるが、林内雨量は樹冠の貯留機能によって、時間の遅れがあるため、林外雨量を上まわるところがあり、また、降雨がなくとも表れることもある。

ここに示した例は、春から秋にかけて、それぞれ異なった降雨のパターンによるものを選んだものであるが、実測精度にも多少問題があることを考慮すれば、ほぼ良好な一致が得られたものと考えられる。

V 要 約

樹冠の降雨遮断現象により、降雨の一部が消失し、残りが樹冠通過雨量、樹幹流量などとして林地の地表面に到達する過程を、ヒノキ人工林における観測データを用いて時系列的に解析を行った。

(1) 試験地は、茨城県西茨城郡岩瀬町所在の国有林で、笠間事業区 38 林班・に小班の 29 年生ヒノキ

人工林である。ヒノキ林の林分面積は 4.5 ha, 平均樹高 11 m, 平均胸高直径 16.1 cm, 材積 140 m³/ha, 林冠疎密度は密で, ほぼ完全にうっ閉している。

林分の標高は 250~350 m で, 試験区の中心は 270 m である。傾斜は 11° 程度, 傾斜方位は N45°E である。

表層地質は花崗岩で, 土壌は関東ローム層からなり, 褐色森林土壌 B₄ である。土層の厚さは, A₀ 層 1 cm, A 層 20~30 cm, B 層 60 cm, C 層は非常に厚い。

(2) 林外雨量は, 試験区に隣接して設けた気象観測露場で, 口径 200 mm の普通雨量計と, 同口径の長期自記雨量計を併用して観測した。林内雨量は, ヒノキ林分の中心部に設けた 4.5×6.5 m の試験区で観測した。樹冠通過雨量の観測には, 受水幅 20 cm, 長さ 512 cm の樋型雨量計 3 本を用い, 樹幹流下量は全木の鉢巻式の集水装置を取り付けて, 集めた雨水をそれぞれ量水装置により計量した。観測は 1979 年 11 月に始められたが, ここで用いた資料は, 1980 年 1 月~12 月のものである。

(3) 樹冠遮断量 P_I は, 林外雨量を P , 樹冠通過雨量を P_T , 樹幹流下量を P_s とすれば,

$$P_I = P - (P_T + P_s)$$

となり, 観測値から求めることができる。

遮断現象は, 樹冠による雨水の一時的な保留と放出によるものであるから, 森林土壌における浸透現象と類似性を有する面があるとみることが出来る。すなわち, 遮断能は, 浸透量のうち, 蒸発散などにより流出に加わらない成分に相当し, 林内雨量が中間流出, 地下流水出などに相当するという見方である。いま, 任意時間における樹冠の遮断量を遮断能と呼ぶことにし, P_i (mm/hr) とおき, 降雨が長時間継続した場合の遮断量を最終遮断能 P_c (mm/hr), 降雨開始時期の遮断量を初期遮断能 P_0 (mm/hr), 減衰係数を α とおけば,

$$P_i = P_c + (P_0 - P_c)e^{-\alpha t}$$

となり, P_i は, P_c , P_0 , α によって求められる。 P_0 は, 樹冠が乾いているときは, 各降雨ごとの平均降雨強度 r_a と, 直達雨量率 a とから, $P_0 = (1 - a)r_a$ とおくことができる。

P_c , α は, 直接に求めることができないので, P_i を時間 t について積分し,

$$\Sigma P_i = P_c t + \frac{P_0 - P_c}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t})$$

とし, $\Sigma P_i = P_I$ とおくことにより, P_c , α を統計的に推定した。

単位時間を 20 分としたときの P_c は, 0.17 mm/20 min となり, α は, 平均降雨強度が 3 mm/20 min 以下では 0.6, 3 mm/20 min をこえると, $\alpha = 0.2 r_a$ という結果が得られた。

(4) 降雨が中断した場合は, 遮断能 P_i は回復するので, その回復過程を樹冠保留雨量と遮断能, ならびに樹冠保留雨量の時間的変化の二つの面から考えた。

樹冠保留雨量を W_i , 飽和樹冠保留雨量を W_s , 樹冠が乾いた状態における保留雨量を 0, 遮断能を P_0 とすれば,

$$P_i = P_c + \frac{P_0 - P_c}{W_s} (W_s - W_i)$$

$$W_s > W_i > 0$$

となる。さらに, 樹冠保留雨量が時間 t とともに指数関数的に減少するものとし, 減衰係数を β とすれば,

$$W_i = W_{i0} e^{-\beta t}$$

とおくことができる。

W_i は、 ΣP_i の増加傾向が、降雨強度が大きくなるにつれにぶくなり、 $P_e \cdot t$ を除く第 2 項の限界が 4mm 程度であることから、この 4mm にとることとした。

β は、直接求めることができないので、降雨の中断期間を含む降雨資料を用いて、遮断能の減衰過程を考慮して、シミュレーションにより推定した。観測資料の精度との関係もあり、かなりのばらつきが生じたが、 $\beta = 0.3$ という結果を得た。

(5) 林外雨量の時系列 r (1~ n) と、 P_e 、 W_i 、 α 、 β ならびに降雨開始時点の樹冠の保留雨量 W_i から、有効林内雨量を推定した。

この量は、一定の時間的遅れをもって、林内雨量として林地表面に到達する量と考えられる。

(6) 樹冠貯留水が、滴下または樹幹流下によって林地表面に至る過程を、流出関数の方法を用いて計算した。

単位時間の有効林内雨量を $f \cdot r$ とおけば、任意の単位時間における林内雨量 P_{n_f} は、

$0 < t < t_0$ で

$$\sum_{t-t_1}^{t_2} P_{n_f} = \int_{t_1}^{t_2} f r \{1 - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1)\} dt$$

$t \geq t_0$ で

$$\sum_{t-t_1}^{t_2} P_{n_f} = \int_{t_1}^{t_2} f r \{e^{-\lambda t'} (\lambda t' + 1) - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1)\} dt \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\ t' = t - t_0$$

とおくことができ、この λ によって、林内雨量の時間分配率が決められる。

林外雨量、林内雨量の観測資料を、コリンズの用いた逐次修正法により解析し、 $\lambda = 7$ が求められた。

(7) 有効林内雨量と流出関数法により、林内雨量を時系列として推定し、実測資料と比較したところ、ほぼ良好な一致が認められることが明らかとなった。したがって、ある林分において、必要な水文因子が得られれば、林外雨量の時系列から、林内雨量の時系列の推定が可能となる。

引用文献

- 1) 近嵐弘栄：山地小流域における有効雨量の推定。林試研報，320，123~157，(1982)
- 2) 近嵐弘栄・服部重昭：ヒノキ林における樹冠遮断現象の解析—降雨継続時の樹冠遮断量—。日林論，93，443~444，(1982)
- 3) COLLINS, W. T.: Runoff distribution graphs from precipitation occurring in more than one time unit. Civil Engineering, 9(9), 559~561, (1939)
- 4) 藤井真一：ヒノキ林の遮断雨量に関する試験。日林誌，41(7)，262~269，(1959)
- 5) 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治：エネルギー収支によるヒノキ林の蒸発散量測定。日林誌，63(4)，125~132，(1981)
- 6) 服部重昭・近嵐弘栄・竹内信治：ヒノキ林における樹冠遮断量測定とその微気象学的解析。林試研報，318，79~102，(1982)
- 7) HELVEY, J. P. and PATRIC, J. H.: Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of Eastern United States. Water Resour. Res., 1(2), 193~206, (1965)
- 8) 平田徳太郎：樹冠保留雨量に就いて。森林測候所特別報告，6，1~38，(1921)
- 9) HORTON, R. E.: Rainfall interception. Mon. Wea. Rev. 47, 603~623, (1919)

- 10) 石原安雄・小葉竹重棧：雨水流出現象における初期貯留量について—樹木による降雨遮断。京大防災研年報, 13B, 69~81, (1970)
- 11) JACKSON, I. J. : Relation between rainfall parameters and interception by tropical forest. *J. Hyd.*, 24, 215~238, (1975)
- 12) 角屋 睦・豊国永次・大達俊夫：山地小流域河川の低水解析 (2)。京大防災研年報, 10B, 147~154, (1967)
- 13) 金 東 燮：朝鮮に於ける林内外雨量の観測。昭和14年日林講, 247~252, (1939)
- 14) KITTREDGE, J. : Forest influences. McGraw-Hill, 99~114, (1948)
- 15) 河野良治・菊谷昭雄・志水俊夫・近嵐弘栄・竹内信治・平 和敬・服部重昭：南部温帯林の水保全機能の解明。「農林漁業における環境保全的技術に関する総合研究」試験成績書, 第3集, 207~218, (1979)
- 16) 熊谷 猷：クロガネモチ林の樹冠保留雨量。森林測候所特別報告, 8, 231~233, (1922)
- 17) LEYTON, L., REYNOLDS, E. R. C., & THOMPSON, F. B. : Rainfall interception in forest and moorland. *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, 163~178, (1967)
- 18) LINSLEY, R. K. Jr., KOHLER, M. A., PAULHUS, J. L. H. : *Applied Hydrology*. 312~314, McGraw Hill, (1949)
- 19) McNAUGHTON, K. G. & BLACK, T. A. : A study of evapotranspiration from a douglas fir forest using the energy balance approach. *Water Resour. Res.*, 9, 1579~1590, (1973)
- 20) 材井 宏：森林植生による降水の遮断についての研究。林試研報, 232, 25~64, (1970)
- 21) MURPHY, C. E. & KNOERR, K. R. : The evaporation of intercepted rainfall from a forest stand, An analysis by simulation. *Water Resour. Res.*, 11, 273~280, (1975)
- 22) 農林省山林局：林木の雨水保持量に関する試験。森林測候所特別報告, 4, 205~220, (1917)
- 23) PENMAN, H. L. : *Vegetation and hydrology*. C. A. B. England, p. 35, (1963)
- 24) ROBINS, P. C. : A method of measuring the aerodynamic resistance to the transport of water vapour from forest canopies. *J. Appl. Ecol.* 11, 315~325, (1974)
- 25) RUTTER, A. J., KERSHAW, K. A., ROBINS, P. C. & MORTON, A. J. : A predictive model of rainfall interception in forests I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agr. Meteorol.*, 9, 367~384, (1971)
- 26) RUTTER, A. J., MORTON, A. J., & ROBINS, P. C. : A predictive model of rainfall interception in forests II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hard wood stands. *J. Appl. Ecol.*, 12, 367~380, (1975)
- 27) 神保幸雄：林内外観測位置の相違に基く降水量の差について。森林治水気象集報, 1, 52~58, (1923)
- 28) STEWART, J. B. : Evaporation from the wet canopy of a pine forest. *Water Resour. Res.*, 13, 915~921, (1977)
- 29) STOUT, B. B., and McMAHTON, R. J. : Throughfall variation under tree crowns. *Jour. Geophys. Res.*, 66, 1839~1843, (1961)
- 30) 鈴木雅一・加藤博之・谷 誠・福嶋義宏：桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流下量, 遮断量の研究 (I), 樹冠通過雨量と樹幹流下量について。日林誌, 61(6), 202~210, (1979)
- 31) 鈴木雅一・加藤博之・谷 誠・福嶋義宏：桐生試験地における樹冠通過雨量, 樹幹流下量, 遮断量の研究 (II), 遮断量の解析。日林誌, 61(11), 391~398, (1979)
- 32) SZEICZ, G., ENDRÖDI, G. & TAJCHMAN, S. : Aerodynamic and surface factors in evaporation. *Water Resour. Res.*, 5, 380~394, (1969)
- 33) 武田京一：林地雨量について。気象集誌, 29(6), 19~32, (1951)
- 34) 田崎忠良：降雨下に於ける林木の水分附着量について。日林誌, 32(2), 56~61, (1950)
- 35) ZINKE, P. J. : Forest interception studies in the United States. *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon, Oxford, 137~161, (1967)

Estimation of the Net Rainfall in a Hinoki Stand

Hiroei CHIKARASHI⁽¹⁾ and Shigeaki HATTORI⁽²⁾

Summary

A hydrological process of rainfall interception by canopy, which partly lost by evaporation and partly reaches the forest floor as throughfall or stemflow, was analytically studied in process of time, with the data observed in the planted Hinoki (*Chamaecyparis Obtusa* SIEB. et Zucc.) stand.

1) The experimental plot was situated in the national forest near Iwase-cho in Ibaraki prefecture. The area of the Hinoki stand is 4.5 ha, 29 years of stand age, 11 m in average stand height, 16.1 cm in average D. B. H., about 140 m³/ha in volume, dense crown density, and of satisfactory crown closure.

The average altitude of the stand is from 250~350 m above the sea-level and about 270 m at the center of the plot. The slope is 11° and the average bearing N 45° E.

The geology on the surface is granite and the forest soil is Kanto-roam, classified Forest brown soil Ba. Thickness of the soil is 1 cm in A₀ horizon, 20~30 cm in A horizon, 60 cm in B horizon, and thick C horizon.

2) Precipitation was observed at the adjacent weather station with a 200 mm totalizer rain gauge together with the same diameter recording rain gauge.

The net rainfall was observed at the plot of 4.5 × 6.5 m, at the center of the stand. Throughfall was measured by 3 iron troughs, 20 cm in width × 512 cm in length each and stemflow was measured by the head band type collector on all trunks in the plot. Each of the rain water was recorded by the water-level recorders equipped with automatic drainers.

Observation were carried on since Nov. 1979 and the data from Jan. to Dec. 1980 were applied in the study.

3) Interception loss of canopy P_I is as follows, when the actual observations of precipitation is P , throughfall P_T and stemflow is P_S .

$$P_I = P - (P_T + P_S) \dots\dots\dots(1)$$

As rainfall interception is due to the temporary storage and release of rain by canopy, its function is similar to infiltration of forest soil.

That is, interception loss is equivalent to the component in the infiltrated water which is lost through evaporation and do not enter to runoff. Net rainfall is equivalent to interflow and ground water flow.

When the interception loss in a given time is interception capacity P_i (mm/hr), and the interception loss in long duration rain is final interception capacity P_c (mm/hr), & at the beginning of rain is initial interception capacity P_0 (mm/hr), & extinction coefficient of interception capacity is α , we can obtain P_i from P_c , P_0 , and α as the following equation,

$$P_i = P_c + (P_0 - P_c) e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(2)$$

where t means elapsed time.

In this equation, when the canopy is dry, P_0 can be replaced by the average rainfall in-

tensity and the direct rainfall ratio a , as $P_0 = (1 - a)r_a$. P_c and α can not get directly from the observed data.

Accordingly, P_t is integrated by elapsed time t , and the following equation is obtained.

$$\Sigma P_t = P_c t + \frac{P_0 - P_c}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Simultaneously, as $\Sigma P_t = P_I$, P_c and α are estimated stochastically.

As a result, P_c was 0.17 mm/20 min when unit time is 20 min, α was 0.6 when rainfall intensity is less than 3 mm/20 min and $0.2 r_a$ when rainfall intensity is over 3 mm/20 min, and r_a is average rainfall intensity of unit time (mm/20 min).

4) When rainfall is interrupted, as interception capacity P_t recovers, its process is considered from mutuality of interception capacity and timely change of interception storage.

When interception storage is W_t , saturated interception storage is W_s , storage after the successive drought is 0, and interception capacity is P_0 , we get following equation.

$$P_t = P_c + \frac{(P_0 - P_c)}{W_s} (W_s - W_t) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$W_s > W_t > 0$$

Further, when interception storage forms a recession curve of exponential function by elapsed time t , and extinction coefficient is β , then

$$W_t = W_{t_0} e^{-\beta t} \quad \dots\dots\dots (5)$$

According to the stochastic analysis, as increase trend of ΣP_t in the equation (3) becomes dull as rainfall intensity is higher and forms a limit around 4 mm of 2nd term of the equation excluding $P_c \cdot t$, we take this 4 mm as W_s .

As β is difficult to calculate directly from the observed data, it was estimated by the simulation method considering the depression process of interception capacity, with the data which contain rainfall interruption.

With some irregularity due to the inaccurate observations, the average value 0.3 was obtained.

5) Effective net rainfall was estimated from precipitation in time series r (1~ n), P_c , W_s , α , β , and initial interception storage of canopy W_t .

This is considered that effective net rainfall reached the forest floor with a given time lag.

6) The hydrological process of running interception storage (temporary storage), which reaches forest floor as drip and stemflow, was calculated with runoff function.

When effective rainfall in unit time is $f \cdot r$, net rainfall of a given unit time P_{nf} is calculated as follows,

$$\sum_{t=t_1}^{t_2} P_{nf} = \int_{t_1}^{t_2} f r \left\{ 1 - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

where $0 < t < t_0$

$$\sum_{t=t_1}^{t_2} P_{nf} = \int_{t_1}^{t_2} f r \left\{ e^{-\lambda t'} (\lambda t' + 1) - e^{-\lambda t} (\lambda t + 1) \right\} dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

where $t' = t - t_0$ and $t \geq t_0$

and this λ decides the time distribution of net rainfall on the forest floor. The value of $\lambda = 7$ was obtained from the analysis of gradually approximation method of W. T. Collins, with the observation data of precipitation and net rainfall.

7) It is clear that the reasonable agreement was reached in estimation of net rainfall as

time series with effective precipitation and runoff function method, as compared with the actually observed data.

Consequently, if we obtain the necessary hydrological factors, we can estimate the rainfall of time series from that of the precipitation.