

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 —

石原安雄・小葉竹重機

INITIAL STORAGE OF RAIN-WATER IN RUNOFF PROCESS

—Interception by Trees—

By *Yasuo* ISHIHARA and *Shigeki* KOBATAKE

Synopsis

This paper describes the interception mechanism of rainfall by trees which occurs first in a runoff process. The results obtained by experiments and the theoretical considerations are as follows:

1) The relation between amounts of the water storage on a tree, that is, interception, and the leaves of tree is shown quantitatively to be linear for each kind of trees.

2) The amount of water storage on a tree is constant for a constant intensity of rainfall, and draws exponentially to the maximum value, S_m , for larger intensity of rainfall.

3) In the unsteady state of the interception process, the storage equation of rain-water on a tree during the period of rainfall is shown as equation (8) by using the equivalent area of tree, A_t , which is concerned directly in the process, and the maximum water storage, S_m .

4) In the decreasing state of the water storage on trees after rain ceasing, the storage decreases following to equation (8) during the period of several minutes after ceasing, exponentially for the period later than about 30 minutes, and during the period from several to 30 minutes there exist both the decreasing processes of stem flow and of water drop on leaves.

1. ま え が き

雨水流出については、現在までに非常に多くの研究があり、方法論的には雨水流出過程を現象的に把握しようとするものと、降雨と流出量との関係を解析して内在する法則性を見出そうとするものに分けられる。しかしながら現段階においては、たとえば過去において流出量データのない流域からの流出量を予測する必要性が、最近とくに生じてきているが、今までのところどんな場合にでも適用できるという方法は確立されていない。そこで、もう一度流出現象を1つ1つのプロセスに分解してその機構を詳細に検討することが極めて肝要と考えられる。この研究はこうした立場から、まず流出現象の最初の過程である樹木による降雨遮断の機構を検討したものである。降雨遮断に関する研究は従来、とくに林学の分野において数多く行なわれてきたが、いわゆる水収支的な立場からの研究が多く、流出現象という動的な立場からながめた降雨遮断に関してはほとんど研究がなされていない。すなわち、一連降雨における遮断量がどの程度であるかとか、

1年間の遮断量は年降水量の何パーセントであるかを知る場合には、きわめて豊富な資料が揃っている。本文は主として樹木による降雨遮断の機構を検討するものであるが、従来の研究成果との比較のため、各樹種による遮断量についても考察を加えた。

2. 実験方法

従来、遮断量の測定には大きく分けて2つの方法がとられてきた。1つは実際の山林において林外雨量と林内雨量を測定し、その差を樹木による遮断量とするもの、もう1つは樹を葉、枝、幹に分けて、各々に附着する水分量を計測してその合計として遮断量を求めるものである。前者の方法は雨量計の設置場所として樹幹の近くを選ぶことが多いので遮断量を過大に見積る可能性が大きい。後者は理論的にはよいが計測が面倒という欠点がある。いまある流域において遮断量を推算しようとするときには、いずれの方法にしても、測定した林相または樹木と対象流域の林相との対応関係が明らかになっていなければならない。すなわち、前者の方法では測定した林相と求める流域の林相との対応関係、後者の方法では1本の樹と大小の樹を含む林になった場合との対応関係であるが、従来の研究ではこうした対応関係についての考察は比較的少ない。したがって、遮断の総量とともにこの対応関係を考察するためつぎのような実験方法を採用した。

山地にある樹高約4mの自然木を根元から切って、屋内に持ち帰り、河川災害総合基礎実験施設の天井から重量測定装置(ロードセル使用)を介して吊し、そのうえから人工降雨を降らせてその重量の変化を自記して測定を行なった。1回の測定が終了と下方の枝を切落して再び実験を行ない、さらに順次枝の数を減少させ、各々の段階で測定するという測定方法をとった。今回実験を行なった木の種類はクロマツ、ヒノキ、ツバキの3種で1種につき2本づつ計6本の樹木について実験を行なった。

つぎに、人工降雨は $t=0$ で急に一定強度 r_s とし、重量測定器に現われる記録がほぼ一定となり定常状態になったと判定されたのち、さらに急に降雨をとめて降雨遮断量の減少状態を測定するという方法をとった。こうした測定によって、

- 1) 降雨が急にあった場合の遮断量の増加の仕方
- 2) 降雨が急にやんだ場合の遮断量の減少の仕方
- 3) 定常状態における遮断量 S_s (降雨強度 r_s に対する最大遮断量)

が把握できるわけである。

こうした遮断現象は当然雨水の葉面および枝、幹面における貯留現象とみられるので、以下では遮断の代りに貯留という言葉を用いることとする。

3. 貯留の総量

上記の3)のデータによってある降雨強度に対する遮断の総量 S_s が求められる。

(1) クロマツの場合

クロマツの2本は共に樹高4mでのもので、Fig. 1にその結果を示した。図中横軸は、枝を切り落す各段階について、葉の生重量 w であり、また白丸は、クロマツについて葉、枝、幹の単位表面積当りの最大水分附着量の実験から計算によって求めた田崎の結果²⁾である。遮断に一番大きな影響を与える部分は葉であることからFig. 1では葉の生重量を横軸にとってプロットしたのであるが、実験結果は定性的に田崎の結果とよく一致しており、直線は $r_s=80$ mm/hrに対するものおよび田崎の結果を示したものである。しかし、実験結果を詳細にみると、降雨強度 r_s が大きいほど遮断量 S_s が大きいという傾向がみられるが、これについては4.(3)で詳細に検討するので、ここでは省略する。

葉の生重量は森林の物質代謝を推定する際どうしても必要な量であり、標準林における値が求められているので、あるクロマツ林の葉の生重量はこれとの比較で推定できる。したがってFig. 1の関係から任意のクロマツ林の遮断量を算定することができることとなる。

(2) ヒノキの場合

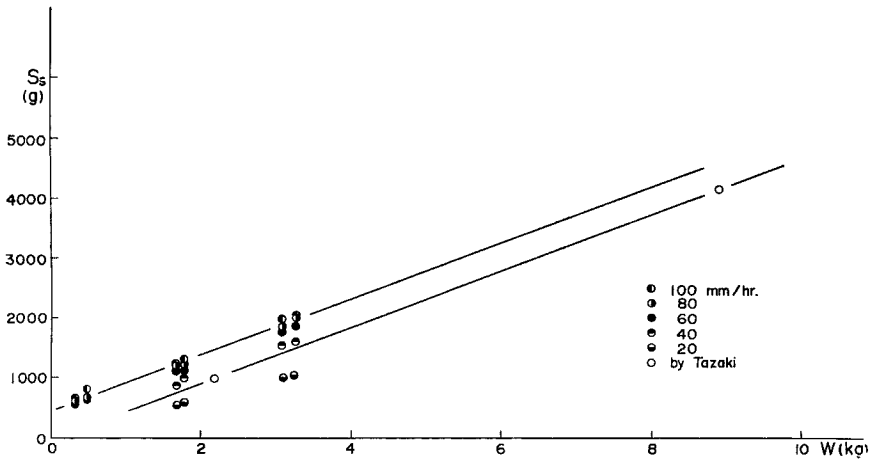


Fig. 1 The relation between amount of storage and weight of leaves in the case of *Pinus thumbergii*.

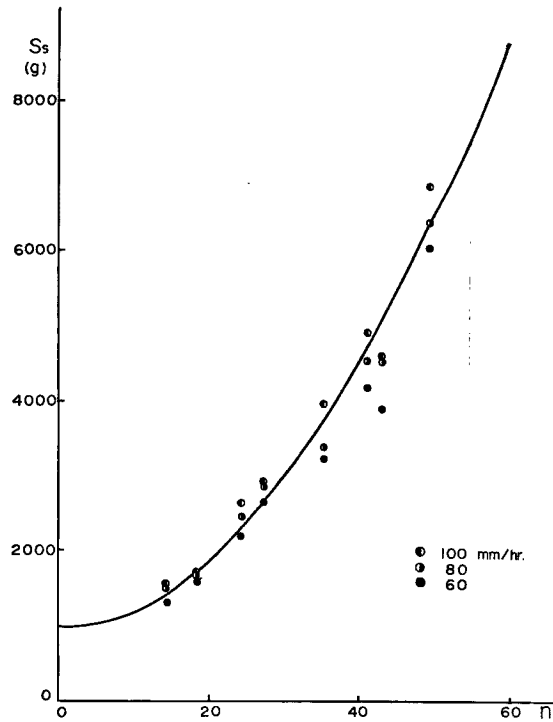


Fig. 2 The relation between amount of storage and number of branches in the case of Japanese cypress.

ヒノキは枝の密度の異なる2本のものを用いたが樹高はいづれも4.3mであった。ヒノキは枝、葉のつき方が複雑でしかも小さな枝と葉との区別がつけにくいので、便宜上、枝の本数 n と貯留量 S_s との関係をプロットしたものがFig. 2である。横軸の枝の本数は樹冠部附近約70cmを1本の枝とし、それより下の枝は1本ずつ加えたものである。下の方の枝ほど葉の面積が大きくなるから、枝数と貯留量は二次曲線の関係と考えられ、クロマツのときと同様に降雨強度によって貯留量は変化するが、 $r_s=80$ mm/hr に対し

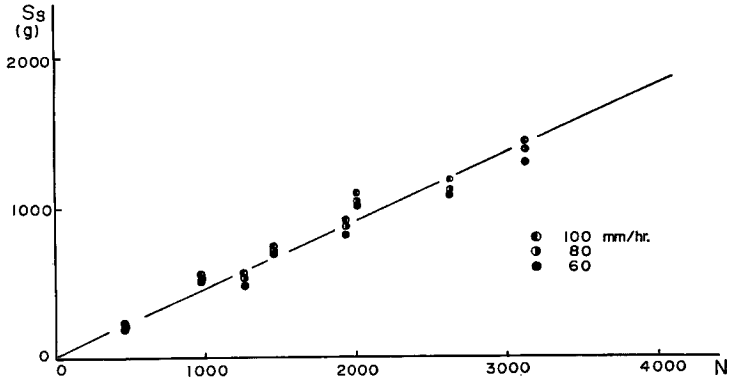


Fig. 3 The relation between amount of storage and number of leaves in the case of camellia.

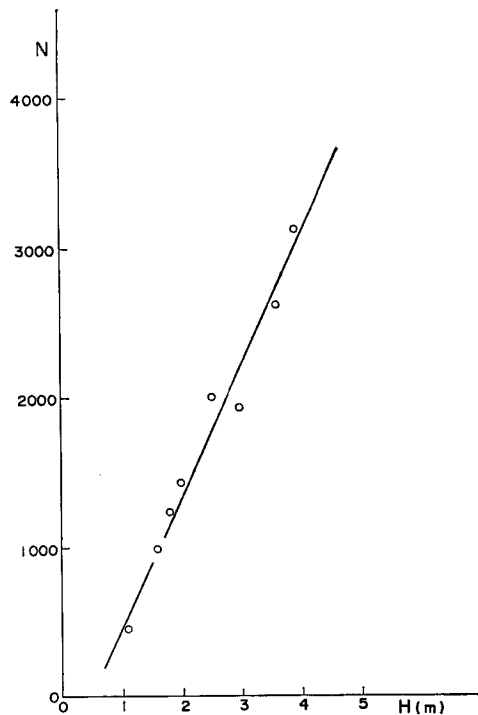


Fig. 4 The relation between number of leaves and height of tree in the case of camellia.

て、 $S_s = 2.2m^2 + 1000$ (S_s : g, n : 本) と与えたのが図の曲線である。こうした関係によって、たとえば現地踏査などにおいて単位面積当りの枝数を求めることによって遮断量が算定できるわけである。

(3) ツバキの場合

ツバキは樹高 4.4 m と 2.7 m の 2 本について実験を行なった。葉数 N と貯留量 S_s の関係を示したものが Fig. 3 である。Fig. 4 は横軸に 1 番下の枝から樹頂までの高さ H をとり、縦軸に葉数 N をとったものである。この関係が一次の関係となっているのは下枝程、枝と葉のつき方が疎であって、樹高方向の単位長さ当りについては葉数が一定していることを示している。Fig. 3 (図中の直線は $r_s = 80$ mm/hr に対するもの) と Fig. 4 とから同種のツバキについてはその樹高を知ることによって大略の遮断量を算定することができることとなる。

以上、クロマツ、ヒノキ、ツバキの遮断量を遮断の主要な場である葉との関係において説明してきた。このことは 3 種類の樹種はそれぞれ異なった葉をもっているが、いずれの場合も葉の数の増加とともに遮断量が比例的に増加するという常識的な考え方を実証したものである。実際の流域の遮断量を求める場合には、もちろんこれだけの樹種では十分ではないが、これら 3 樹種の形態的特性を考慮に入れることによって、他の樹種の遮断量の予測がある程度可能であると思われる。すなわち、クロマツは幹の同一の箇所から枝が出て層を形成し、ヒノキは幹に枝が連続的についており全体として円錐形であり、ツバキは広葉樹の特徴であるように、上部は中心となる幹の判別がつきにくく、枝の先端にだけ葉がついていて木の全面をおおっている。このように実験に用いた樹種はかなり異なった形態であるのでこれと類似した樹種であればこの実験結果からある程度の精度で遮断量の予測が可能と思われるわけである。

4. 貯留の機構

(1) 貯留量の増加特性

Fig. 5 は一定の降雨を急に与えたときのクロマツとヒノキの貯留量の増加曲線である。図中 P.1-0 とはクロマツの 2 本のうちの No.1 で枝を 1 度も切落さないもの、C.1-1 とはヒノキの 2 本のうちの No.1 で枝を 1 度切落したものを表わし、以後このような表現を用いることにする。

さて、立上りの特性をみるために Fig. 5 (a), (b) において降雨強度 r_s と時間 t との積が等しくなるように、どちらか一方の時間軸を拡大または縮小して他方に重ねたものが Fig. 6 である。クロマツ、ヒノキい

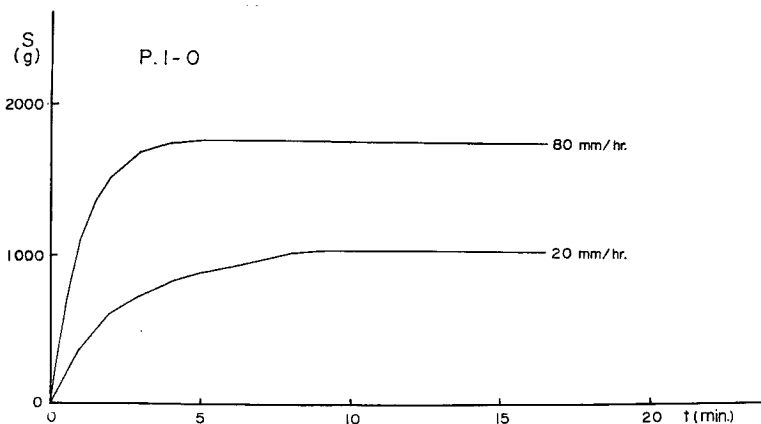


Fig. 5-(a) The increasing curve of water storage. P.1-0 means *Pinus thumbergii*, No.1, of which branches are not cut down.

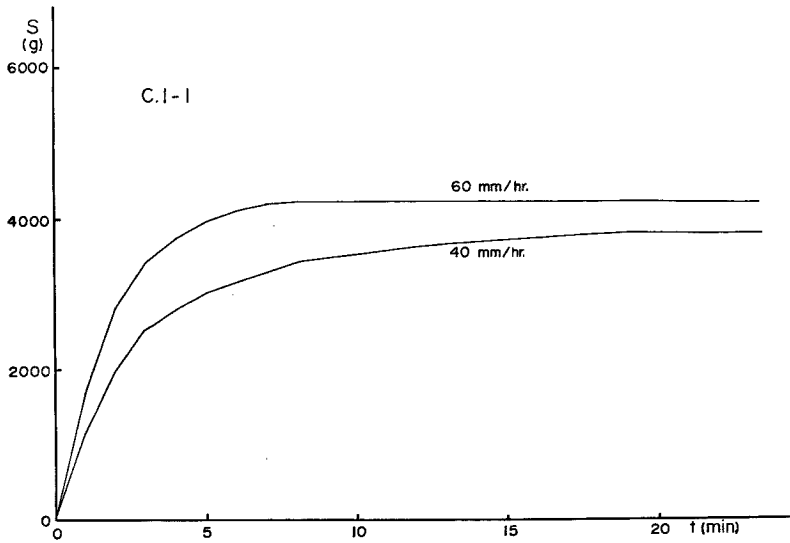


Fig. 5-(b) The increasing curve of water storage. C.1-1 means the Japanese cypress, No.1, of which several branches on the lower part of stem are cut down as the first step.

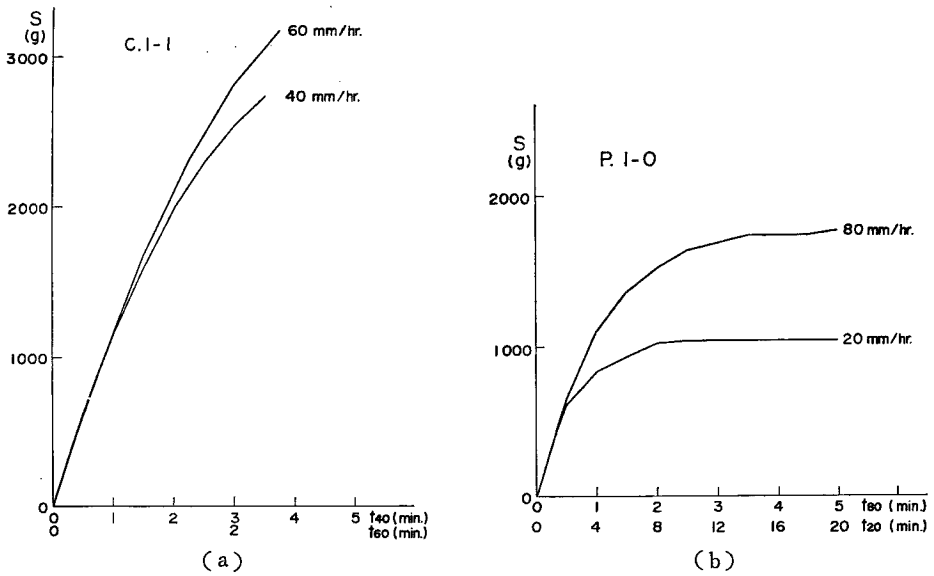
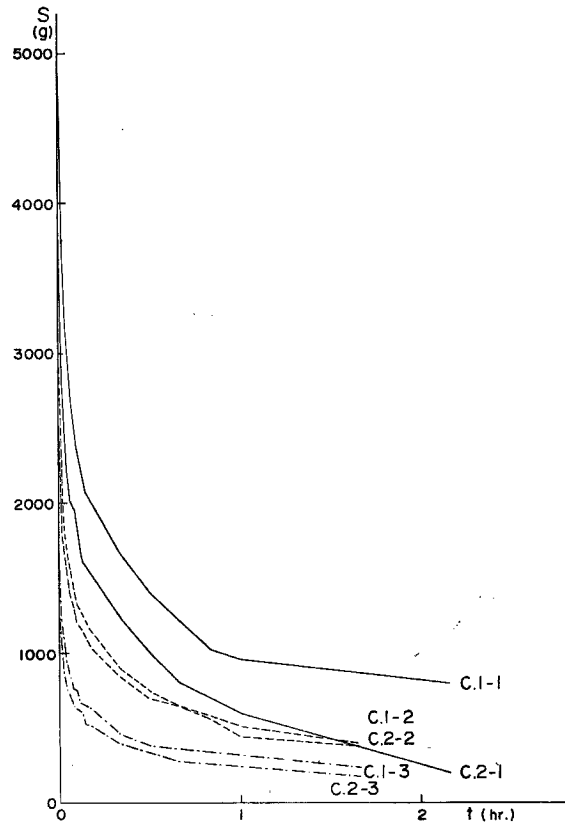
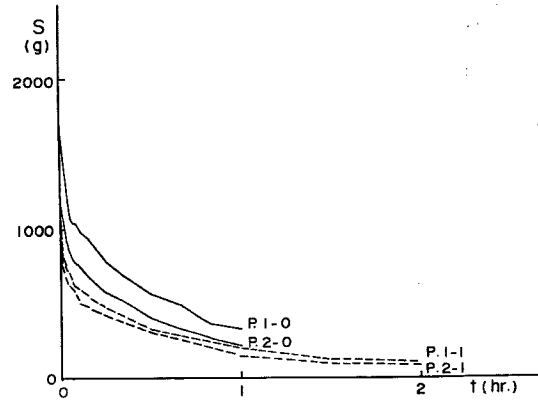


Fig. 6 The modified increasing curve of water storage for different intensities of rainfall.



(a)



(b)

Fig. 7 The decreasing curve of water storage.

ずれも立上りの部分は完全に一致している。このことから、いま仮に平均的な意味でその木の貯留に関与する部分の等価的な面積が一定で、これを A_t で表わされるものとすれば、この期間では $S = A_t r e^{-t}$ が成立し、降雨初期においては雨水がすべて貯留されることを示すものである、もっとも、この関係は第1近似において成立するものと考えられるが、上式より立上りの勾配から逆に A_t を算定すると、P.1-0 では、 $9,700 \text{ cm}^2$ 、C.1-1 では $18,300 \text{ cm}^2$ となる。

つぎに、その後においては貯留量の増加の割合が漸減し、やがて定常状態に達している。この曲線は一定の容量をもち、かつ排水口のある容器に水を注いだときと類似の増加特性を示していると考えられる。

(2) 貯留量のてい減特性

Fig. 7 はクロマツとヒノキの場合について降雨を停止したときの貯留量のてい減曲線である。一般にこのような貯留量のてい減時には単位葉面積当りで考えると、初期状態のいかんにかかわらず、ある時間経過後

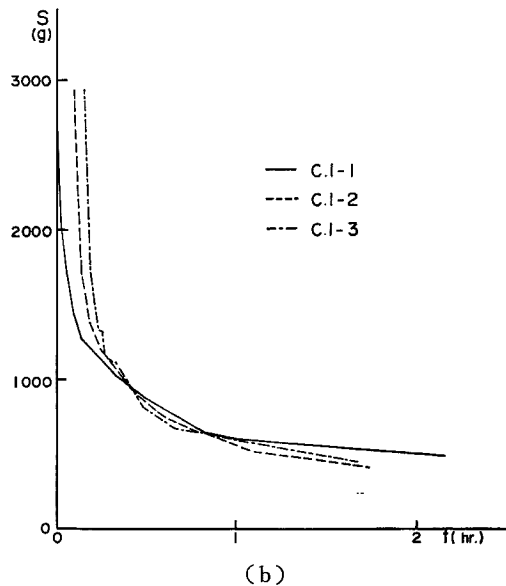
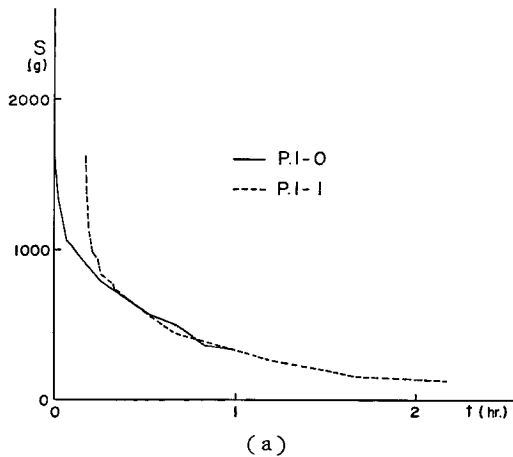


Fig. 8 The modified decreasing curve of water storage.

は一定の過程をたどることが予想される。こうした性質をみるために、ある基準のてい減曲線に対して他の曲線の縦軸を原則として基準の木の葉面積と同じになるように適当に変化させ、さらに時間軸を水平にずらして重ねたものが Fig. 8 である。すなわち、(a)図は P.1-1 の初期貯留量 1200 g と P.1-0 の初期貯留量 1620 g との比（葉面積比にほぼ比例する）で P.1-1 の縦軸を変更し、さらに初期値の影響は不明であるので2つの曲線が一致したと思われるまで時間軸方向に移動させて求めたものである。(b)図は同様に C.1-2 を基準として求めたものである。これらの図においててい減曲線がほぼ一致する部分と一致しない部分に分れており、この2つの領域でてい減の機構が変化することを示しているものと思われる。すなわち、(a)図についていえば P.1-1 の貯留量が 600~700 g より以下、時間では20~25分以降になるとほぼ一致しており、さきに予想した特性があることを示すものである。まずこの部分の機構を考えてみることにする。

(a)図を半対数紙上にプロットしたものが Fig. 9 であって、この図において、2本の曲線が一致する範囲では直線的にてい減特性を示している。したがって、降雨停止後20~30分経過すると初期状態に無関係にてい減特性を示し、次式が成立することが明らかにされた。

$$S = S_0 e^{-\beta t} \dots\dots\dots (1)$$

これを現象面からみると、葉の上の小さな水滴が傾斜した葉面上を滑りつつ次第に大きくなり、やがて葉の先端から落ちる現象に対応していると思われる。なお Fig. 9 において直線部分からあとに再びこの直線からはずれる部分がでてくるが、このあたりからはまた別の機構のてい減、たとえば雨水が葉面に附着してしまつて蒸発だけによるてい減が始まるものと考えられる。

つぎに2本の曲線が一致しない部分、すなわち時間でいえば30~20分以前の機構であるが、それ以後の機構を水滴によるてい減としたことに対して、この期間では一応、水が連続した状態で流下するやうにてい減と考えてみよう。そのときには、葉面上で降雨終了後20~30分たつてなお水が連続した状態であると考えるのは事実と反すると思われる。一方樹幹流下が消失するのは大体20~30分であつてこの時刻とほぼ一致する。しかしながら貯留の主要な場が葉面であることを考慮すると、前述したような葉面上での連続的な流れによるてい減という考え方は成立しないように思われる。以上の考察によってこの期間は、葉面上での水が連続しているごく僅かな期間と、(1)式で示される期間に至るまでの樹幹流下と葉面からの水滴落下で構

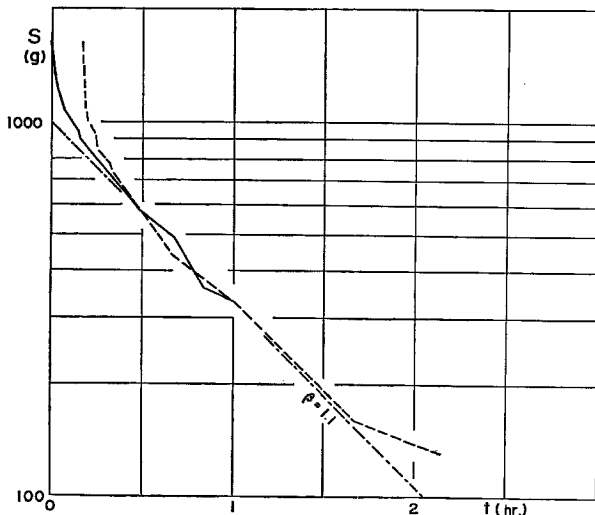


Fig. 9 The logarithmic representation of the modified decreasing curve of water storage.

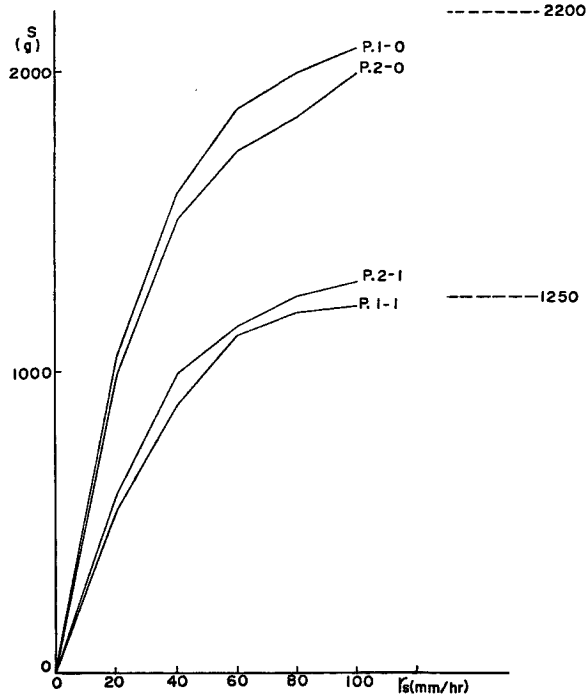


Fig. 10 The relation between the amounts of storage, S_s and rainfall intensity, r_s , in steady state.

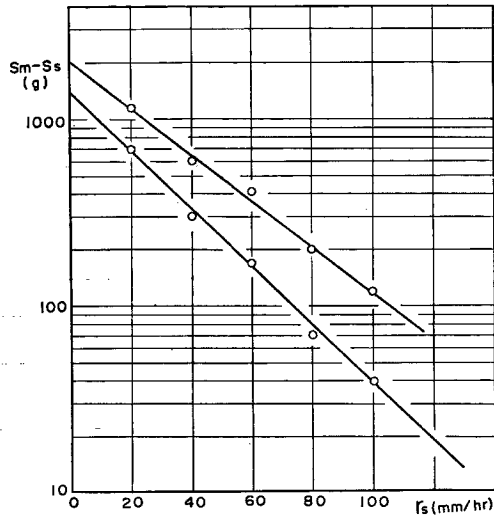


Fig. 11 The relation between $(S_m - S_s)$ and rainfall intensity r_s . S_m is the maximum storage capacity and S_s is the amount of storage under constant rainfall intensity r_s .

成される過渡状態の期間とが組合わさったかなり複雑な減過程と考えるべきであろう。

(3) 定常状態における r_s と S_s の関係

さきに、貯留の総量 S_s が降雨強度 r_s によって変化することを指摘しておいた。この両者の関係を調べるために、クロマツについて降雨強度を 20 mm/hr から 40 mm/hr, 60 mm/hr, 80 mm/hr, 100 mm/hr とステップ状に上げていき、各段階で定常に達した時の貯留量 S_s と降雨強度 r_s との関係を示したものが Fig. 10 である。この図から貯留量 S_s には上限があるように見える。そこで P.1 についてまず比較的この上限が推定しやすい P.1-1 についてその量 S_m を 1250 g と仮定した。P.1-0 と P.1-1 は枝を切らないものと一度切り落したものとを意味しており、その貯留能力の比はほぼ葉の生重量の比になるから、1250 g にこの比を乗じて P.1-0 の上限 S_m を 2200 g とした。このようにして定められた S_m を用い、ある降雨強度 r_s における定常貯留量 S_s との差 ($S_m - S_s$) とそれに対応する r_s とをプロットしたものが Fig. 11 であり、半対数紙上でほぼ直線とみなせる関係を示している。このことは、貯留の総量は降雨強度によって変化するが、降雨強度が非常に強くなると貯留が増し重量が大となるために、葉が曲り下がり、その間にある平衡状態が保たれ、一定の上限値が存在することを意味するものと考えられる。

(4) 貯留方程式

いままで述べてきた実験的事実とそれに対する考察の結果より、降雨遮断現象における貯留方程式はつぎのように表わされる。

1) 定常の場合

葉面上における雨水の貯留の式は降雨が連続している場合 (3) における結果 Fig. 11 より、貯留量 S_s には上限があり、また r_s の指数関数であることから次式で与えられる。

$$S_s = S_m(1 - e^{-\alpha r_s}) \dots\dots\dots(2)$$

(2) 式より

$$r_s = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S_s}{S_m} \right) \dots\dots\dots(3)$$

連続の式は、貯留に実際に関与する部分の等価的面積を A_t 、この面積 A_t から落下する量を Q_s とすると、

$$\frac{dS_s}{dt} = A_t r_s - Q_s = 0 \dots\dots\dots(4)$$

よつて

$$Q_s = A_t r_s \dots\dots\dots(5)$$

(3) 式と (5) 式より

$$Q_s = -\frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S_s}{S_m} \right) \dots\dots\dots(6)$$

(6) 式が定常状態における降雨が連続している場合の貯留方程式である。 A_t に対してその木の幾何学的地上投影面積を A とすると $A_t/A = d$ は捕捉率ともいふべきものを意味し、実流域への適用に際してこうした等価的な面積 A_t と捕捉率 d という考え方は有用となるはずである。

2) 非定常の場合

いま考えている運動の場が葉面という非常に小さな場であることから、非定常の場合にも定常の場合の関係が成立するとすれば (6) 式から

$$Q = -\frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \dots\dots\dots(7)$$

連続の式 $dS/dt = A_t r - Q$ に (7) 式を代入すると

$$\frac{dS}{dt} = A_t r + \frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \dots\dots\dots(8)$$

(8) 式が非定常における降雨が連続している場合の貯留方程式である。

a) 降雨開始時

降雨強度を一定とすると逐次近似法による第一次近似は、

$$S_t(t) = S_0 + \int_{t_0}^t \left\{ A_t r_s + \frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S_0}{S_m} \right) \right\} dt \dots\dots\dots(9)$$

で与えられる。とくに初期条件 $t_0=0$ で $S_0=0$ の場合には、

$$S_t = A_t r_s t \dots\dots\dots(10)$$

となる。 $t=0$ の近傍では立上りの曲線は (10) 式で与えられることを意味し、4.(1) で述べた特性を示す。

b) 降雨終了時

$r=0$ であるから

$$\frac{dS}{dt} = \frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) \dots\dots\dots(11)$$

$1 - S/S_m = x$ とおき、初期条件 $t=0 : S=S_0$ で積分すると

$$\int_{1 - \frac{S_0}{S_m}}^{1 - \frac{S}{S_m}} \frac{dx}{\ln x} = \frac{A_t \cdot t}{\alpha \cdot S_m} \dots\dots\dots(12)$$

(12) 式が降雨終了直後の雨水がまだ連続して流下している場合のてい減を表わす式である。

(5) 貯留方程式による計算結果と実測との比較

1) 増加部分

Fig. 6 (a) の立上りの勾配から逆算した A_t を用いて (8) 式を降雨強度 20 mm/hr の条件で図式解法によって計算した結果が Fig. 12 の破線である。(8) 式の性質から立上り部分は完全に一致しているが、以後も実測値に近い値を示している。両者の間に若干の差があるが、しかし遮断現象そのものが本質的に変動する要素をもって同一の強度の降雨に対して何時も同じではないという実験的事実を考慮すると、かなり良好な一致であると考えてよいだろう。

2) てい減部分

この場合と同じ A_t を用いて (12) 式を計算した結果が Fig. 13 の破線である。縦軸は P.1-0 の貯留能力 S_m とその時刻の貯留量 S との比である。降雨終了後1分までは実測と一致しており、(12) 式が雨水が連続して流下しているときに成立する式であることから、降雨終了後約1分で葉面上での雨水の流れは終了することが推定される。これ以後は葉面では水滴状態のてい減になるが、前に考慮したように降雨終了

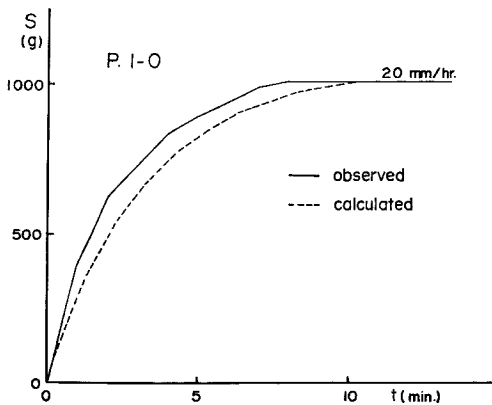


Fig. 12 The comparison of calculated and observed increasing curves of water storage.

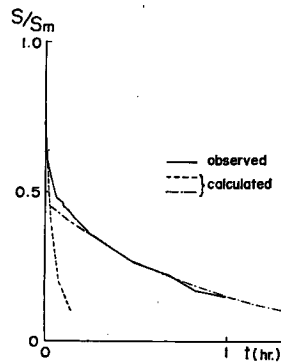


Fig. 13 The comparison of calculated and observed storage decreasing curves of water storage.

後20～30分までは樹幹流下とが混在した状態でい減する。さらに20～30分経過して樹幹流下が消失すると、(1)式で表わされる水滴のみのてい減になり、Fig. 9 から $\beta=1.1$ としたものが Fig. 13 の鎖線で示されている。さらに時間がたつとやがて蒸発だけのてい減に移行することとなる。

3) 増加部分とてい減部分の比較

非常に弱い一定の降雨がある場合、葉面上で雨水が連続体として貯留されるのではなく、てい減の部分で述べたような水滴として貯留されている状態も考えられる。もし降雨がある場合でもない場合でも水滴の貯留のされ方が同じであるとするならば、(1)式で求めた β を用いて定常状態における $A_t r_s = \beta S_s$ の関係から降雨がある場合の S_s が算定できるはずである。こうして S_s を求めてみると P.1-0 に対してたとえば $r_s=2$ mm/hr の時に S_s は 1762 g となって非常に大きな値となり、Fig. 10 の $r_s=60$ mm/hr に相当し不合理である。このことから同じ水滴の状態でも貯留されていても降雨がある場合と降雨がない場合では、貯留の機構は全く異なっていることが予想される。機構の異なり方として考えられるのはやはり水滴か連続体かということであり、降雨がある場合は貯留のされ方が水滴であっても常に連続的に発生し、あたかも連続体のように考えてよいように思われる。

以上の考察から降雨が始まった場合と、降雨が終了した直後における雨水の運動は(8)式で表わされ、さらにてい減部は(1)式へと移行すると考えてよいだろう。

5. む す び

雨水流出の1つのプロセスである樹木による降雨遮断の機構を検討した結果を述べてきたが、結果を要約するとつぎのようである。

- 1) クロマツ、ヒノキ、ツバキの貯留量と、貯留の主要な場である葉に関する量との関係を降雨強度を媒介として定量的に示すことができた。
- 2) 降雨のある場合の葉面上における雨水の貯留方程式は次式で表わされる

$$\frac{dS}{dt} = A_t r + \frac{A_t}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)$$

ここに A_t は貯留に関与する等価的な面積を表わす。

- 3) 上式および実験的事実から降雨開始時の貯留量の立上り曲線は $S = A_t r_s t$ で表わされる。
- 4) 前式において $r=0$ として求めたてい減曲線は降雨終了後約1分の間は実測とよく一致し、その時刻に葉面における雨水の連続体としての流下が終了し、違ったてい減状態を示すようになる。
- 5) 降雨終了後約30分からは水滴の落下によるてい減となり、 $S = S_0 e^{-\beta t}$ で表わされる。
- 6) 降雨終了後約1分から約30分の期間は前記2式の現象が同時に生じている過渡期である。

雨水流出現象における初期貯留は樹木による遮断の他に、草による遮断、くぼ地貯留、土湿量の増加分などがあり、さらにこうしたものについて研究を進めて行くつもりである。

最後に本研究を行なうにあたって、貴重な木の提供を受けた京大農学部上賀茂試験地の関係者の方々、適切な助言を頂いた同上伊佐義朗講師に深甚の謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) たとえば平田徳太郎：樹冠保留雨量について、森林測候所報告, No.6, 1920, pp.1~38.
Kittredge, Joseph: Forest Influences, 1948.
- 2) 田崎忠良：森林の雨水遮断作用について(II), 東京大学立地自然科学研究所報告, No.4, 1956, pp.49~56.