

斜面ライシメーターにおける 傾斜別・土層条件別水収支の研究

近嵐弘栄⁽¹⁾・服部重昭⁽²⁾・竹内信治⁽³⁾・坪山良夫⁽⁴⁾

Hiroei CHIKARASHI, Shigeaki HATTORI, Nobuji TAKEUCHI and Yoshio TSUBOYAMA :
The Water Balance by the Different Slope and Soil Condition
in the Sloping Lysimeter

要 旨：斜面ライシメーターを用いて、傾斜地における傾斜度・土層条件の相違が、地表流出・地下水流出・蒸発散量などに及ぼす影響を試験した。斜面ライシメーターは、一区画の大きさが幅 3 m、斜面長 6 m、斜面と直角方向の深さが 2 m のコンクリート製で、傾斜度は 15°、25°、35° の 3 種あり、いずれも南面している。各傾斜について、砂質ローム、およびロームの 2 種の土層の厚さの割合を変えて、全体で 1.75 m の深さに充填した 3 つの土層タイプがあり、合計 9 区画からなっていて、表面は芝張りである。

流出量は地表流出がごくわずかで、大部分は地下流出であった。月別にみると、各土層タイプとも、傾斜度の大きい場合の方が流出量が少ない。同じ傾斜度で土層タイプが異なる場合には、流出量にほとんど差が生じない。年間の水収支では、各土層タイプとも、傾斜度が大きい方が流出量が少なく、傾斜度間の差は 50~60 mm 程度であった。また、各傾斜度別に、年間の降水量と流出量との間に、ほぼ線形の相関が認められた。1 降雨ごとの増加流出量は、同じ土層タイプでも、傾斜度の大きい場合の方が少ない。また、同じ傾斜度の場合には、ロームだけの土層の厚さが大きい場合の方が、ハイドログラフのピークが大きく、その現れるのも早い傾向が認められた。

斜面の傾斜度の違いによる年蒸発散量の差は、斜面の受ける日射量の差から、ほぼ説明できることが明らかになった。

目 次

I	まえがき	2
II	測定装置および測定方法	3
	1. 斜面ライシメーター	3
	2. 量水装置	5
	(1) 自動排水装置	5
	(2) 自記水位計	5
	(3) データ集録処理装置	8
	3. 雨量計	9
	4. 温度計、湿度計、風向・風速計、日射計、記録装置	9
III	充填土壌の理化学性および地表植生	13
	1. 充填土壌の理化学性	13
	2. 地表植生	13
IV	結果と考察	15
	1. 気象観測	15
	2. 月別水収支	15

3. 年間の水収支	15
4. 1降雨ごとの降雨量と流出量	24
(1) 流出量の分離	24
(2) 1降雨ごとの雨量と増加流出量	26
(3) 1降雨ごとの1時間当たり流出量	27
5. 年蒸発散量とその経年変化	27
6. 年蒸発散量と年降水量および年可能蒸散量との関係	35
7. 傾斜および土層条件が水収支に及ぼす影響	38
(1) 傾斜が蒸発散に及ぼす影響	38
(2) 土層条件が水収支に及ぼす影響	40
8. 土層条件および傾斜が流出特性に及ぼす影響	41
(1) 土層条件が流出特性に及ぼす影響	41
(2) 傾斜度が流出特性に及ぼす影響	41
V 要約	42
引用文献	43
Summary	45

I まえがき

林業試験場千代田試験地（茨城県新治郡千代田村）の斜面ライシメーターは、林業試験場の研究学園都市への移転に伴って、1976～1977年にかけて建設され、計測器械の整備が進められた。

斜面ライシメーターによる研究は、移転に先立って、目黒時代にも行われ、傾斜地における植被の変化と降雨の流出、蒸発散、土壌水分などの諸関係、特に、植物の土壌水分消費のメカニズムについて、研究が進められ、一応の成果²⁾が得られており、また、同様の目的で、東北支場でも、研究が進められていた⁴⁾。

そこで、新設の斜面ライシメーターでは、研究の重点を、従来の植生・地被の問題から、立地的な因子としての傾斜度の相違、土層厚さ、土層構造の相違などが、水循環、水収支などに及ぼす影響に移すことにした。

降雨、流出量の観測は、1978年6月から開始されたが、当初使用していた自動排水装置の排水パイプの軸受け部分に漏水が多発したことから、土層に浸入してから流出する水量を計測記録するデーター集録処理装置が停電等により欠測を生ずるなどで、年間水収支の完全な観測データーが得られなかった。

その対策として、自動排水装置には、林業試験場により改良された新しい型¹⁾を用いることにし、流出量の観測には、データー集録処理装置と併行して、アナログ式の自記水位計を設置することにより、停電時等における欠測を補うことにした。その結果、1981年の後半から連続したデーターが得られるようになった。

土壌水分の観測は、諸般の事情から行うことができず、月別、期間別の水収支などは詳しい解析は困難で、この点は今後の問題として残された。

なお、気温、湿度、風向、風速、日射量などの資料は、千代田試験地の観測資料に負うものである。また、農業土木試験場・紙井泰典氏（現在高知大学農学部）には、日射量関係について、引用文献³⁾のほかに、貴重な資料のご提供をいただいたことを記して、謝意を表す。

記号説明

本論文で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 定数 constant

b " "

D_0 可照時間 (12 hr/day) possible duration of sunshine

E 蒸発散量 (mm) evapo-transpiration

E_p 可能蒸発散量 (mm) potential evapo-transpiration

l 水の蒸発潜熱 (cal/gr) latent heat of water

P 降水量 (降雨量) (mm) precipitation

P_i 1降雨量 (cal/gr) rainfall of each storm

Q 日射量 (ly) solar radiation

q_t 月平均気温に対する飽和絶対湿度 (g/m^3)

saturate absolute humidity to average monthly temperature

R 流出量 (mm) runoff

R_b 基底流出量 (mm) base runoff

R_d 直接流出量 (mm) direct runoff

R_f 増加地下流出量 (mm) increased seepage

R_G 地下流出量 (mm) seepage

R_r 増加流出量 (mm) increased runoff

R_n 純放射量 (ly) net radiation

R_s 地表流出量 (mm) surface runoff

t 気温 ($^{\circ}C$) air temperature

α アルベド (反射係数) (%) albedo

ΔS 土壌水分変化 (mm) change in soil moisture content

II 測定装置および測定方法

1. 斜面ライシメーター

斜面ライシメーターは、1区画の大きさが幅3m、斜面長6m、斜面と直角方向の深さが2mのコンクリート製で (Fig. 1)、傾斜は15°、25°、35°の3種あり、いずれも南面している。各傾斜について、関東ロームに砂を加えたもの (SL)、および関東ローム (L) だけのものの2種の土層の厚さの割合を変えて、全体で1.75mの深さに充填された下記のような三つの土層タイプがあり、合計9区画からなっている (Photo 1, 2)。

A (L: 175 cm), B (SL: 25 cm, L: 150 cm), C (SL: 50 cm, L: 125 cm)

また、各区画とも、土層の底に10cmの砂利層があり、表面は芝張りとなっている。

各区画からの流出量は、地表流出量、中間流出量、(土層の境界面からの流出量)、および地下流出量

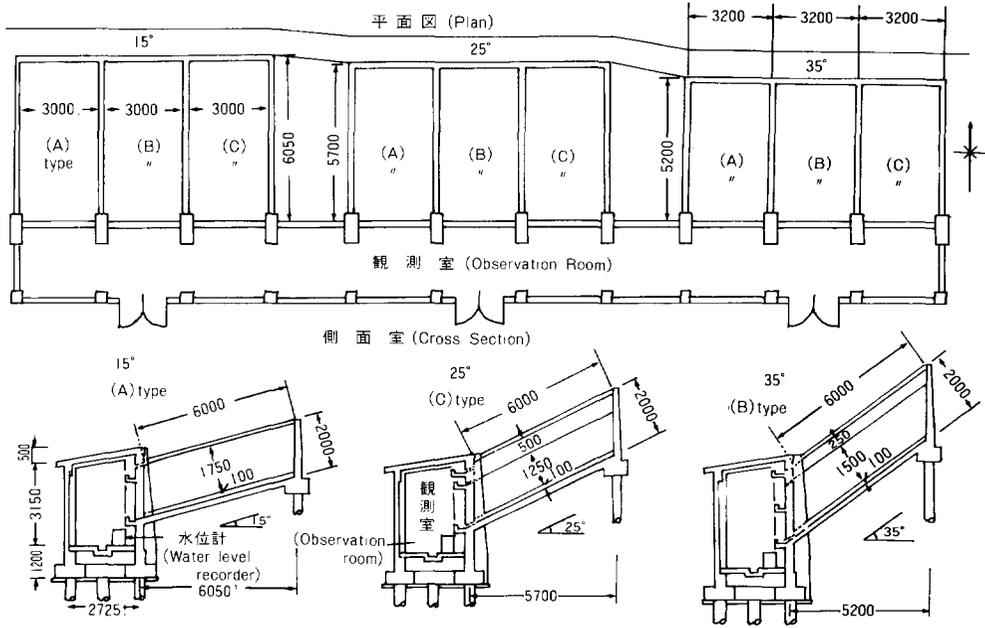


Fig. 1. 斜面ライシメーター構造図 (Unit mm)
Sloping lysimeter.



Photo 1. 斜面ライシメーター全景
A whole view.



Photo 2. 斜面ライシメーターの観測室
Observation room.



Photo 3. 自動排水装置（FC-60）
Automatic drainage mechanism.

（底面に達した流出量）として、下部の観測室へ導かれる。なお、中間流出量は、1979～1981年の予備観測で、ほとんどみられず、ごくわずかであったので、地下流出量に含めて取り扱っている。

2. 量水装置

(1) 自動排水装置

林試型自動排水装置は、幅 35 cm、奥行 60 cm、高さ 60 cm の金属製の水槽に、サイホン管をとりつけたもの¹⁾である（Fig. 2, Photo 3）。排水機構は、“ししおどし”の原理の応用によるもので、水槽から引き出された排水管を可撓性の排水管で先端の回転部につなぎ、回転部の先端が排水口となっており、他端に重錘^{すい}が取りつけてある。

排水管内に流入する水の重量と重錘とのバランスで、筒の回転、排水、反転、排水停止を自動的に行うようになっている。

貯水、排水によって生ずる水位差は約 40 cm で、水量にして約 80 l である。排水速度は、水槽への水の流入を停止した状態で平均 1 l/s であり、サイホン管の働く下限水位付近で 0.3 l/s 程度となる。

この下限水位での排水速度は、豪雨に際して観測された、ライシメーターから自動排水装置の水槽へ流入する単位時間（秒）当たりの水量の 2 倍程度となっている。

1981年の初めから、林試型の自動排水装置を使用した²⁾が、排水装置における故障は、ほとんどみられず、順調に作動した。

(2) 自記水位計

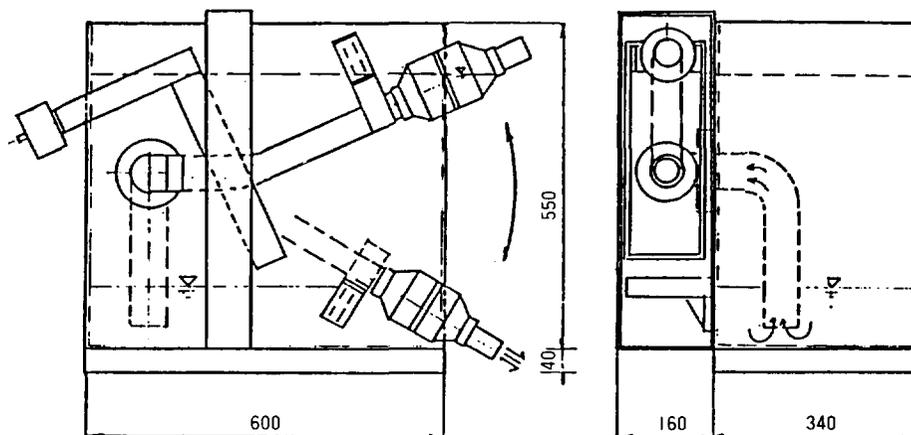


Fig. 2. 自動排水装置 (FC-60) (Unit mm)
Automatic drainage mechanism of a gauging tank.



Photo 4. 自記水位計 (FW-25)
Water level recorder.

自記水位計は、Fw-25型水位計（ウイジン工業社製）、(Fig. 3, Photo 4) を用いており、フロート式で、流出水による水槽の水位の上昇、排水による下降を、自動的に記録する。流出量は、1時間ごとに水位の記録を読みとり、それを水高 mm に換算した。

Fw-25型水位計は、紙送り速度が 20 mm/h または 5 mm/h で、どちらかを選択できるが、5 mm/h の場合は、記録用紙の取替期間が 4 か月となっている。紙送りの時計は、観測開始当初は音叉式であったが、1982～1983 年にかけて水晶式のものに取り替えた。

自記水位計の記録は、あとで述べるデータ集録処理装置が停電、故障などでデータに欠測を生じた場合の補完用として使用した (Photo 5)。

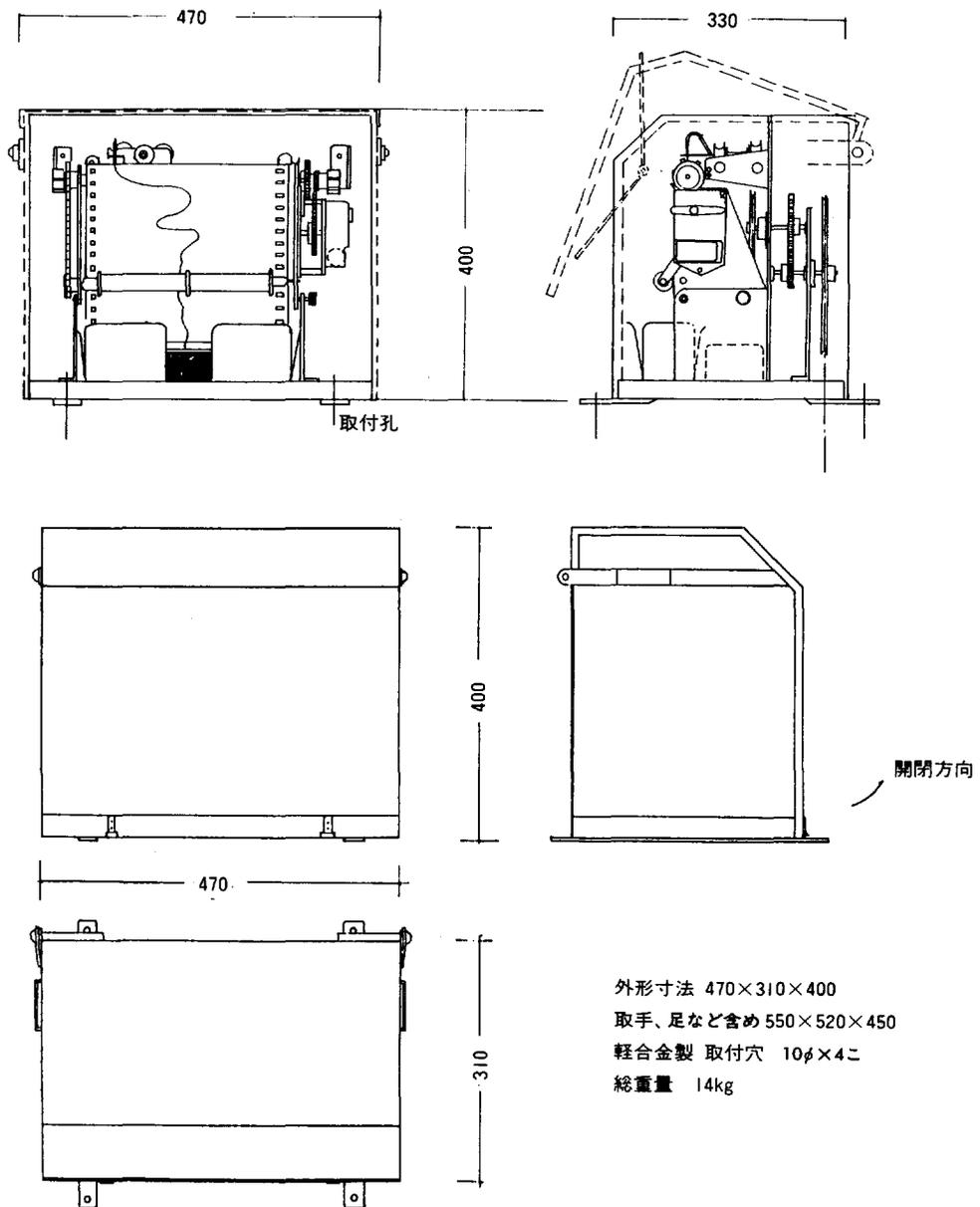


Fig. 3. 自記水位計 (FW-25型) (Unit mm)
 Water level recorder (FW-25 Type).



Photo 5. 複式の水位計測システム
A two-way water level recording system.

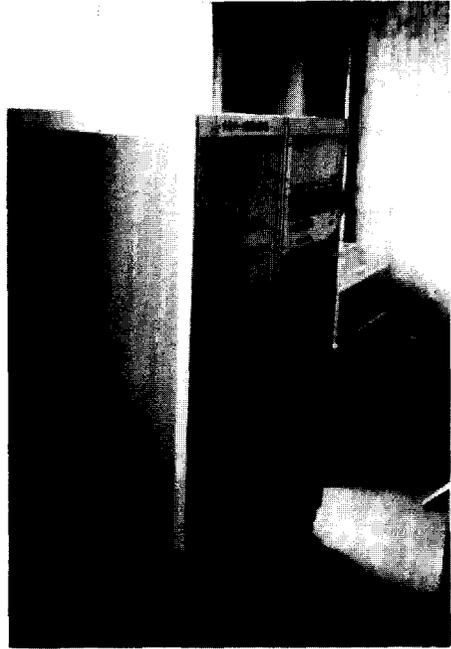


Photo 6. データ集録処理装置
Recording system.

観測室は、温度、湿度などが比較的安定しており、器械の稼働条件がよいため、自記水位計の作動も良好であった。

(3) データー集録処理装置

データー集録処理装置は、Fig. 4 に示すように、水位計発信器、水位変換モジュール、ユニットインターフェイス、メインコントローラ、I/O コントローラ、プリンター、予備電源装置等からなっている (Photo 6)。水位計発信機はフロート式で (Photo 7)、ポテンショメータを内蔵し、水位変化を電圧変化としてとり出し、それを水位変換モジュールにより直流 0~1 V の信号に変換する。

変換された信号は、ユニットインターフェイスを通して、メインコントローラへ送られる。

メインコントローラ (電子計算機) は、NASCON-1000 型を使用した。入力信号要素に応じて最大 32 種類の要素の設定が可能であり、この水位信号のほかに、一時は、他の気象要素のデーター集録も行った。

入力データーは、2 分ごとに集録され、計算処理のうえ累積し、1 時間ごと、1 日ごとに、プリンターに印字される。

プリンターは、事務用に用いる IBM 82 C 型を改造したものであるが (Photo 8)、冬期の温度低下により作動不良を生ずることがあり、電気ヒーターによって保温することにより、正常な作動を維持した。

停電に備えて、予備電源装置をおいたが、これは、直流 24 V の鉛蓄電池を用い、設定値、時計の消失を防ぐもので、計算上は 62 時間程度のバックアップが可能とされるが、実際には蓄電池の能力低下とか、電力のロスなどもあり、1 日程度であった。

データー集録処理装置は、多数の区画の長期間にわたる連続データーを自動的に計算処理し、印字する

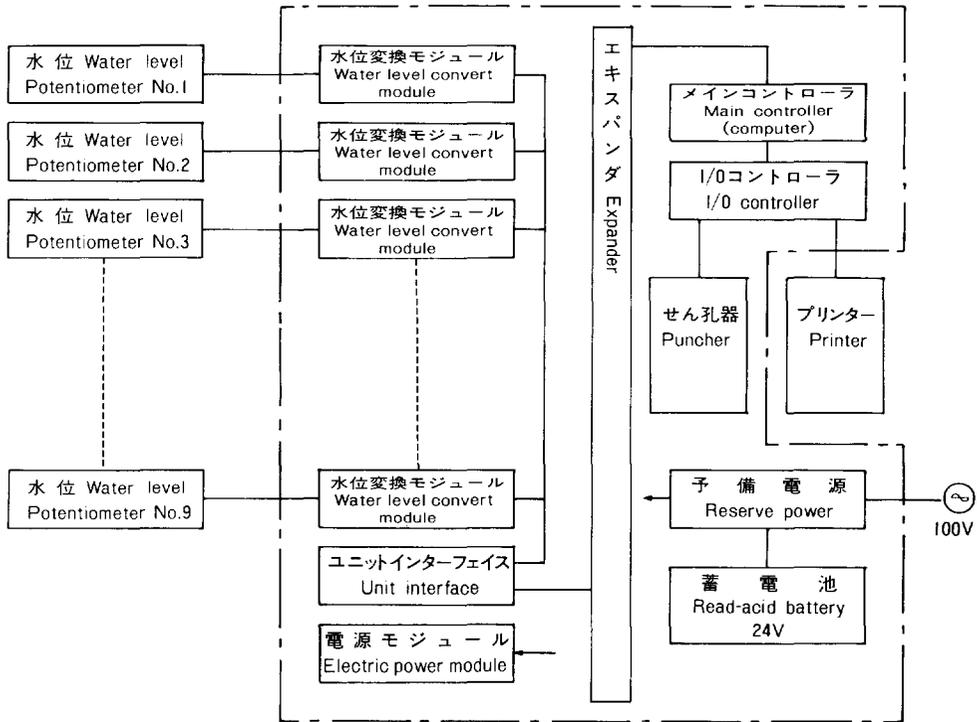


Fig. 4. 水文データ集録処理装置の構成
Composition of the hydrological data acquisition system.

ことができるため、従来用いられたアナログ記録の人力による計算処理に比べ、省力的である。しかしながら、機械の仕組みが複雑であるため、計測の誤差なども入りやすく、また、故障、停電なども伴うので、必ず、併行して、他の計測機器を使用し、補完する必要がある、その点で前述のアナログ式の自記水位計の使用は、有効であった。

3. 雨量計

雨量計は、受水口径が 200 mm のトータライザー 2 台 (Photo 9) と、同じく、受水口径が 200 mm で、1 転倒が 0.5 mm の転倒ます式の長期自記雨量計 (中浅測器 KK 製)、(Photo 10) を、ライシメーター前の露場に設置して観測した。トータライザーは貯留タンク式で、7~10 日間ごとに雨水量を計測し、2 台の平均値をとった。時間当たりの降雨強度については、トータライザーの測定値を基準にして、自記雨量計の測定値を補正した。なお、自記雨量計は故障などで欠測する場合があるので、基準となるもののほかに、予備の自記雨量計を併設して、欠測を補うようにした。

4. 温度計、湿度計、風向・風速計、日射計、記録装置

千代田試験地の気象観測器械の仕様は、次のようになっている (Photo 11)。

(1) 温度計

温度検出器：純ニッケル抵抗体素子

測定範囲：-20~30℃/0~50℃

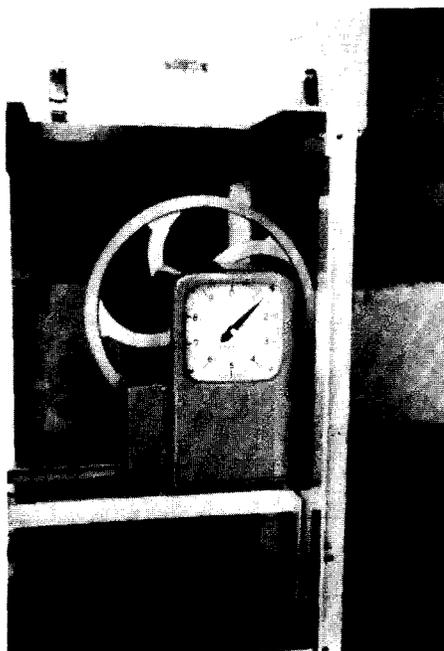


Photo 7. 水位計発振器
A water level transmitter.

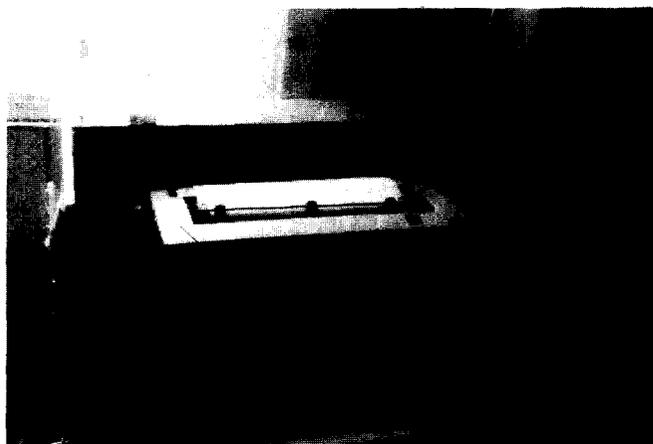


Photo 8. プリンター
Printer (I.B.M.).



Photo 9. トータライザー
Totalizer.

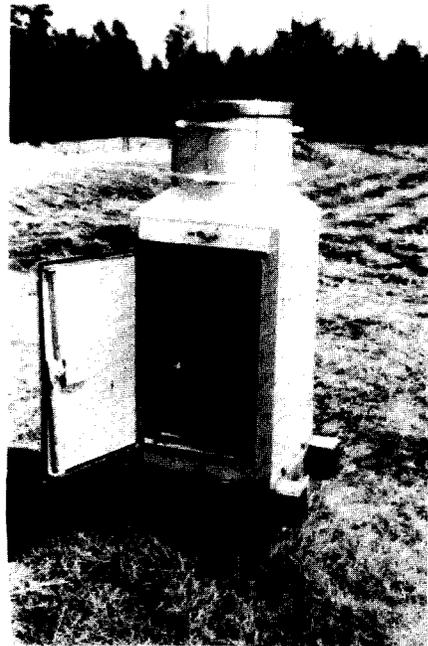


Photo 10. 自記雨量計
Rain recorder.

精度： $\pm 0.5^\circ$

(2) 湿度計

湿度検出器：純ニッケル抵抗素子，通風電動シェルター，給水タンク付き

測定範囲 0～100%（有効測定範囲 20～100%）

(3) 風向，風速計

風車型自記風向，風速計使用

風速検出器：電磁パルスカウンター，風程 100 m で 1 パルス

精度： 10 m/s 以下 ± 50 cm/s

10 m/s 以上で $\pm 5\%$

(4) 日射計

日射検出器：農試電試型日射計

測定範囲：0～2 cal/cm²・min

感度：MV/0.1W/cm²・min

(5) 記録装置

農業気象総合記録装置：飯尾電機 E 686 型

記録方式：打点式，目盛幅 200 mm（Photo 12）

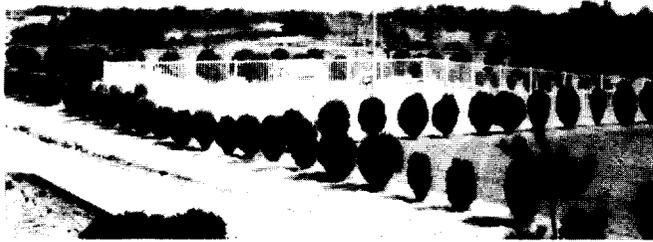


Photo 11. 気象観測露場
Weathering station.

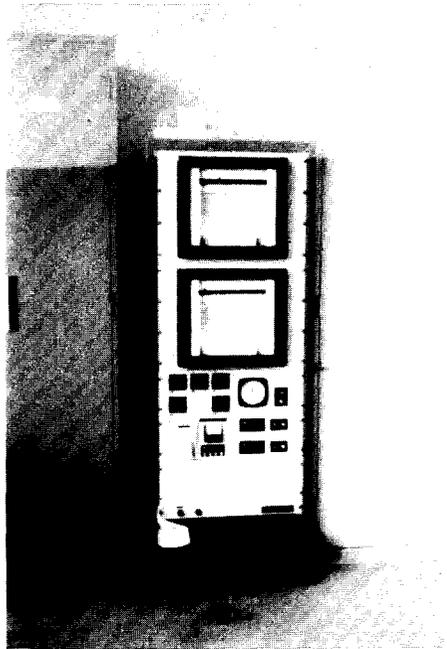


Photo 12. 総合記録装置
Automatic meteorological recorder.

III 充填土壌の理化学性および地表植生

1. 充填土壌の理化学性

充填土壌の理化学性は、Table 1 に示すとおりである。これは、傾斜度 25° の A, B, C タイプの区画の斜面の中央部附近の資料を例示したもので、調査時点は、1982 年 7 月であるから、充填してから約 5 年を経過しており、土層も安定していると考えられる。土壌断面は、Fig. 5 に示すとおりである。

調査方法は、国有林野土壌調査方法書¹¹⁾ によっている。

上層は、関東ロームに山砂を容積比 1:1 の割合で混合したものであり、下層は関東ロームである。

上・下層の粒径加積曲線を、Fig. 6 に示す。

下層の下には 10 cm の厚さの切込み砂利層があり、砂利の最大径は 40 mm である。

ライシメーターの土層を 2 層とした理由は、上・下層の透水性を異ならせることによって、斜面方向の水の動き、すなわち、中間流の動態を把握することを、研究目的の一つとしたためであるが、結果的にみて、上・下層の透水性はあまり大きく変わらず、中間流の発生をほとんどみなかったため、当初の目的を達することはできなかった。

2. 地表植生

表面に張られた芝は、植生の影響を研究の目的とするものではなく、雨水などによる傾斜面からの土壌の移動、流亡を制止することを目的としたものであり、コウライシバ (*Zoysia metrella* MEER.) が用いられた。

土壌断面における根量は、5 cm 程度までは「きわめて多」、同 10 cm までは「多」、同 30 cm までは「あり」、同 80 cm までは「まれ」である。

草丈は、生育期には 10 cm 程度に達することがある。進入してくる雑草を、毎年、定期的に除去し、芝の状態が変化しないようにしたので、観測期間の 1982~1984 年においては、ほぼ安定した植生の状態であったとみなすことができよう。

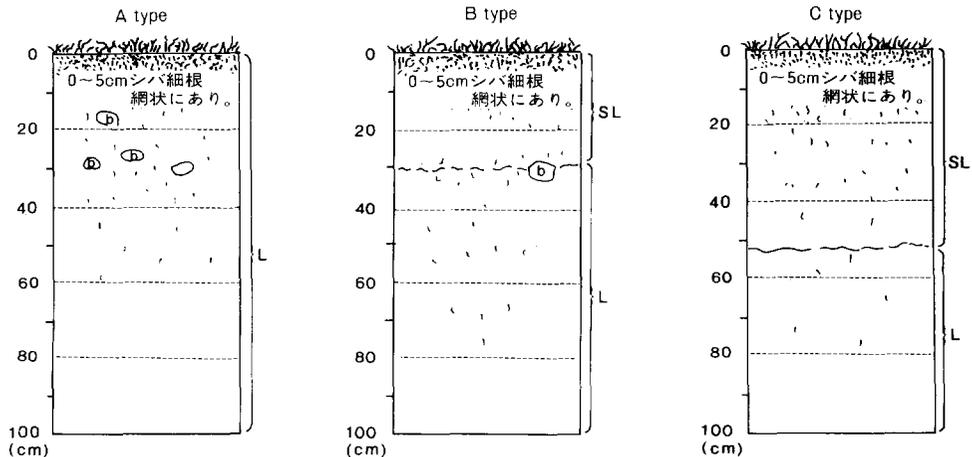


Fig. 5. 土壌の断面
Soil profile.

Note) b: 塊状構造 Blocky

Table 1. 充 填 土 壤
Physical properties

土層充填タイプ Soil layer type	層 Layer	土性 Soil texture	深さ Depth (cm)	容積重 Bulk density (g/100 cm ³)	真比重 Real specific gravity
A	上層 Upper layer	L	10	100	2.73
	下層 Lower layer	L	50	83	2.78
B	上層 Upper layer	SL	10	128	2.68
	下層 Lower layer	L	50	75	2.78
C	上層 Upper layer	SL	10	126	2.73
	下層 Upper layer	L	70	90	2.78

Note) L: ローム loam, SL: 砂質ローム sandy loam

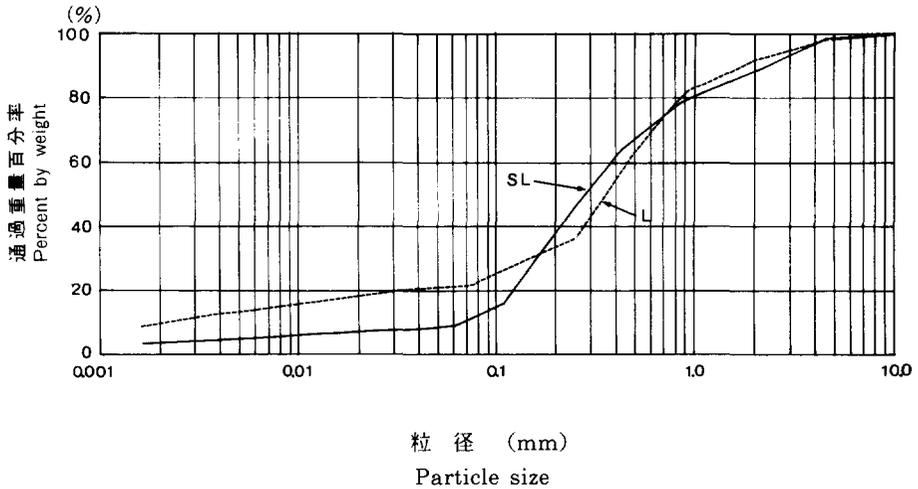


Fig. 6. ライシメーター充填土の粒径加積曲線
Particle size accumulation curve of soil.

の 理 学 性
of soils

傾斜度 Slope 25°

容 積 組 成 Volume composition (%)			孔 隙 組 成 Porosity (%)			透 水 係 数 Coefficient of permeability (cm/sec)
固 体 Solid phase	水 Liquid phase	容 気 Gaseous phase	全 孔 隙 Total pore	細 孔 隙 Fine pore	粗 孔 隙 Coarse pore	
33	41	26	67	27	40	7.46×10^{-3}
27	47	26	73	25	48	6.40×10^{-3}
43	27	30	57	37	20	5.87×10^{-3}
25	50	25	75	28	47	10.27×10^{-3}
42	27	31	58	35	23	5.07×10^{-3}
30	49	21	70	22	48	4.53×10^{-3}

IV 結果と考察

1. 気象観測

1982～1984年の気象観測結果を、Table 2に示す。この表から、1983年の気温がやや低いことがわかるが、それほど顕著なものではない。

降水量は、後掲する Table 3, 4のとおりで、1982年が最も多く、次いで1983年の順になるが、この両年の差はそれほど大きくない。これに対して、1984年は前2年の60%程度であり、したがって、降水量の異常に少ない年の資料による比較検討が可能となった。

2. 月別水収支

観測の結果に基づく月別の降水量、流出量を、Table 3に示す。

地表流出量は、表層の下流端における、いわゆる、かやぶき屋根効果によるもので、各区画とも、全くないか、あっても、ごくわずかであって、ほとんど問題にならない。すなわち、降水は直接蒸発するものを除き、ほぼ全部が浸透水となるものとみて差し支えない。

土壌水分の観測を行っていないので、蒸発散量と土壌水分の変化を合わせた月別水収支を表すことはできないが、降水量に対する流出量の関係だけからみると、Fig. 7のように、同じ土層タイプ(B)でも、傾斜が異なる場合には、月別の流出量はかなり差が生じ、15°、25°、35°の順に流出量が多い傾向が明らかである。同じ傾斜で土層タイプの異なる場合には、Fig. 8のように、流出量にはほとんど差が生じないことがわかる。

3. 年間の水収支

1982～1984年の3年間の降水量と流出量の観測結果は、Table 4のとおりである。

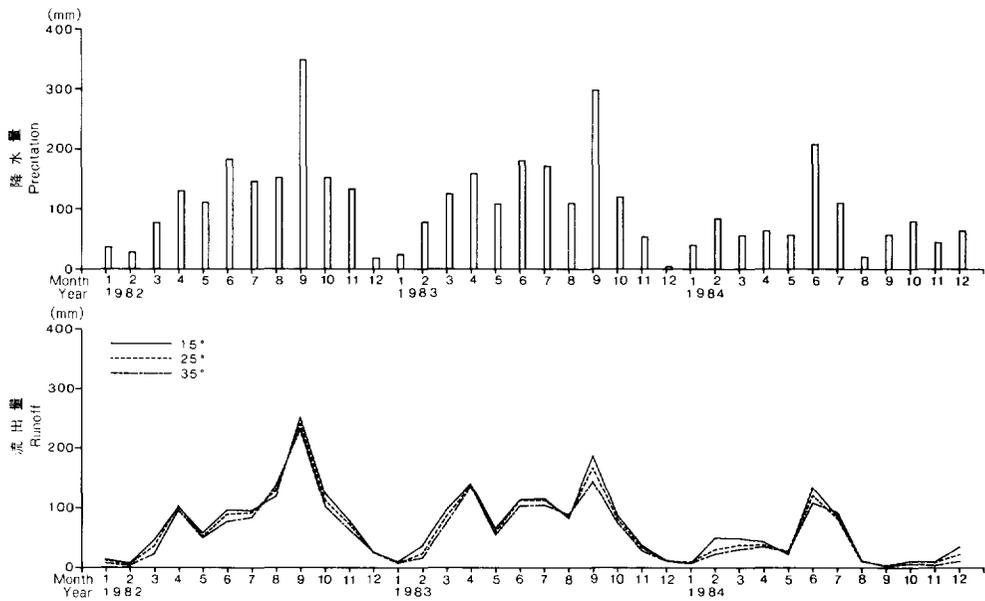


Fig. 7. 月降水量と月流出量の傾斜度別比較 (B タイプ)
Monthly precipitation and comparison of monthly runoff
among three different slopes (B type).

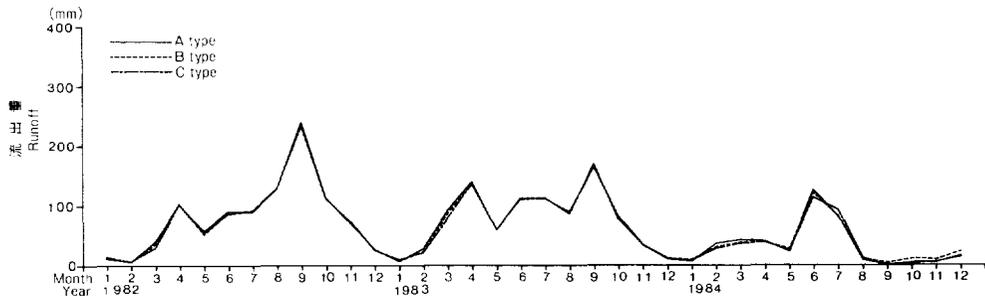


Fig. 8. 月流出量の土層条件別比較 (25°)
Comparison of monthly runoff among three different soil types (25°).

この地域の気象の特性として、12月中の降水量は、1.0 mm (1981年)、18.4 mm (1982年)、4.2 mm (1983年)、62.3 mm (1984)と、ごく少ないか、あっても、年末にかけては乾燥することが多いので、土層の貯留水分も少なくなっている時期である。したがって、各年次間における差も少ないと考えられることから、これら年間の水収支の差は、おおむね傾斜度と土層条件の相違によって、生ずるものとみなすことができよう。

Table 4から、土層タイプ別に、傾斜度別の年間降水量と流出量の関係を見ると、Fig. 9(1)~(3)に示すようになり、傾斜度別の回帰直線を入れてみると、A-15~35°、B-15~35°、C-15~35°のようになる。

これらの結果から、傾斜度 10° ずつの相違が、年間の流出量で 50~60 mm 程度の差となって表れてい

Table 2. 千代田試験地の気象概況

Meteorological condition in the Chiyoda experimental site.

年 Year	月 Month	平均気温 Mean air temperature (°C)	平均最高気温 Mean maximum air temperature (°C)	平均最低気温 Mean minimum air temperature (°C)	平均湿度 Mean relative humidity (%)	平均風速 Wind speed (m/s)	日射量 Amount of insolation (cal/cm ²)
1982	1	4.4	9.7	-0.6	69.3	1.43	231.3
	2	3.8	7.5	-0.7	72.6	1.31	275.6
	3	8.0	13.8	2.3	87.6	1.56	—
	4	11.5	17.8	6.6	98.9	1.95	—
	5	20.4	24.7	13.6	—	2.03	437.4
	6	20.3	23.9	15.5	—	1.55	363.4
	7	22.3	24.8	18.4	—	1.34	270.5
	8	26.0	29.6	22.3	—	1.76	305.7
	9	21.1	24.0	17.7	—	1.62	227.9
	10	17.5	21.5	11.1	76.2	1.23	240.6
	11	13.4	16.9	7.4	78.0	1.04	—
	12	6.7	12.6	1.3	77.1	1.08	143.7
	平均 Mean	14.6	18.9	9.6	—	1.49	—
1983	1	3.8	9.8	-2.4	79.9	1.09	207.0
	2	4.5	8.9	-1.5	53.1	1.50	277.5
	3	7.7	11.7	1.9	65.0	1.59	263.2
	4	15.1	19.4	8.8	99.5	1.86	291.8
	5	18.1	21.1	12.2	72.3	1.79	388.6
	6	19.5	21.9	16.6	76.7	1.56	322.8
	7	22.4	25.6	18.9	89.1	1.43	245.6
	8	25.0	29.5	22.2	93.5	1.57	283.8
	9	22.1	24.7	18.5	89.8	0.87	239.0
	10	15.9	20.6	10.8	78.5	0.71	202.4
	11	11.8	16.2	4.9	69.9	1.06	200.4
	12	6.0	10.7	-1.4	71.3	1.10	202.5
	平均 Mean	14.3	18.3	8.4	78.2	1.34	260.4
1984	1	2.4	7.5	-3.7	82.9	1.14	242.8
	2	1.4	6.8	-3.2	91.4	1.23	236.1
	3	6.3	10.9	-0.4	—	1.33	323.0
	4	12.9	16.8	5.6	75.9	1.48	297.5
	5	18.2	21.9	11.3	80.6	1.58	373.9
	6	20.8	24.2	17.4	—	1.58	247.0
	7	25.8	28.6	21.6	—	1.02	351.7
	8	27.5	33.6	22.5	75.8	—	342.8
	9	23.0	26.5	18.0	94.0	0.92	283.1
	10	17.3	21.0	11.8	—	0.99	202.6
	11	11.4	16.0	3.9	72.5	—	182.9
	12	7.7	11.7	-0.3	73.5	—	162.1
	平均 Mean	14.6	18.8	10.5	—	—	270.5

Table 3. 土層タイプ別の月降水量と流
Precipitation and runoff

年 Year	月 Month	降 水 量 (P) Precipitation (mm)	Slope			
			A Type			流 出 率 Runoff percentage R/P (%)
			流 出 量 (R) Runoff (mm)			
			地 表 流 出 Surface runoff	地 下 流 出 Seepage	計 Total	
1982	1	35.8	0.12	14.70	14.82	41.4
	2	27.9	0.14	5.95	6.09	21.8
	3	76.3	0.12	46.42	46.54	61.0
	4	129.4	0.16	100.64	100.80	77.9
	5	110.0	0.30	55.52	55.82	50.7
	6	183.0	0.64	95.50	96.14	52.5
	7	145.5	0.46	92.58	93.04	63.9
	8	151.4	0.51	111.74	112.25	74.1
	9	347.2	1.70	252.20	253.90	73.1
	10	151.7	0.76	122.00	122.76	80.9
	11	132.6	0.71	77.00	77.71	58.6
	12	18.4	—	26.05	26.05	141.6
1983	1	24.3	0.07	8.89	8.96	36.9
	2	77.5	0.46	39.96	40.42	52.2
	3	124.7	0.53	97.22	97.75	78.4
	4	157.9	0.51	140.40	140.91	89.2
	5	107.5	0.71	63.02	63.73	59.3
	6	180.1	0.58	101.93	102.51	56.9
	7	171.1	1.08	113.03	114.11	66.7
	8	108.3	0.25	76.33	76.58	70.7
	9	296.3	2.09	187.45	189.54	64.0
	10	119.2	0.45	82.28	82.73	69.4
	11	52.7	0.32	37.73	38.05	72.2
	12	4.2	—	10.50	10.50	250.0
1984	1	39.7	0.16	7.03	7.19	18.1
	2	82.9	0.30	57.65	57.95	69.9
	3	55.1	0.11	46.75	46.86	85.4
	4	62.5	0.34	44.54	44.88	71.8
	5	55.7	—	22.84	22.84	41.0
	6	207.2	1.03	131.37	132.40	63.9
	7	109.2	0.87	78.03	78.90	72.3
	8	20.7	—	7.67	7.67	37.1
	9	56.0	—	0.75	0.75	1.34
	10	78.6	0.30	6.84	7.14	9.08
	11	43.3	0.16	8.48	8.64	20.0
	12	62.3	0.32	39.18	39.50	63.4

出量

for three different soil layer types.

15°							
B Type				C Type			
流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)	流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)
地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total		地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total	
—	14.10	14.10	39.4	—	14.15	14.15	39.5
—	6.97	6.97	25.0	—	7.50	7.50	26.9
0.12	46.06	46.18	60.5	—	42.48	42.48	55.7
0.41	100.85	101.26	78.3	—	102.44	102.44	79.2
—	58.15	58.15	52.9	—	55.90	55.90	50.8
0.55	95.98	96.53	52.7	—	93.85	93.85	51.3
0.11	95.51	95.62	65.7	—	96.45	96.45	66.3
0.16	118.51	118.77	78.4	—	122.90	122.90	81.2
—	250.26	250.26	72.1	—	257.50	257.50	74.2
0.69	123.34	124.03	81.8	—	127.21	127.21	83.9
0.41	78.79	79.20	59.7	—	81.70	81.70	61.6
—	26.49	26.49	144.0	—	28.92	28.92	157.2
—	10.07	10.07	41.4	—	11.62	11.62	47.8
0.41	36.50	36.91	47.6	—	32.95	32.95	42.5
0.25	97.31	97.56	78.2	—	94.45	94.45	75.7
0.09	139.81	139.90	88.6	—	139.63	139.63	88.4
—	65.29	65.29	60.7	—	67.17	67.17	62.5
0.41	112.93	113.34	62.9	—	115.24	115.24	64.0
0.18	115.47	115.65	67.6	—	118.07	118.07	69.0
—	82.66	82.66	76.3	—	89.65	89.65	82.8
2.20	184.56	186.76	63.0	—	188.01	188.01	63.5
0.06	87.48	87.54	73.4	—	91.82	91.82	77.0
—	37.64	37.64	71.4	—	40.49	40.49	76.8
—	11.77	11.77	280.2	—	14.06	14.06	334.8
—	6.83	6.83	17.2	—	9.35	9.35	23.6
0.41	48.86	49.27	59.4	—	42.91	42.91	51.8
0.04	48.78	48.82	88.6	—	47.50	47.50	86.2
0.16	42.76	42.90	68.6	—	44.03	44.03	70.4
—	22.45	22.45	40.3	—	27.35	27.35	49.1
0.16	133.70	133.86	64.6	—	122.66	122.66	59.2
—	86.00	86.00	78.8	—	94.93	94.93	86.9
—	11.34	11.34	54.8	—	14.30	14.30	69.1
—	2.62	2.62	4.7	—	6.25	6.25	11.2
—	11.03	11.03	14.0	—	16.39	16.39	28.9
—	9.87	9.87	22.8	—	15.23	15.23	35.2
—	34.93	34.93	56.1	—	33.12	33.12	53.2

Table 3. つづき (Continued)

年 Year	月 Month	降 水 量(P) Precipitation (mm)	Slope			
			A Type			流 出 率 Runoff percentage R/P (%)
			流 出 量 (R) Runoff (mm)			
			地 表 流 出 Surface runoff	地 下 流 出 Seepage	計 Total	
1982	1	35.8	—	11.42	11.42	31.9
	2	27.9	—	5.79	5.79	20.8
	3	76.3	—	40.33	40.33	52.9
	4	129.4	0.32	102.10	102.42	79.1
	5	110.0	—	57.51	57.51	52.3
	6	183.0	0.07	90.40	90.47	49.4
	7	145.5	0.93	88.52	89.45	61.5
	8	151.4	0.22	127.86	128.08	84.6
	9	347.2	0.62	238.15	238.77	68.8
	10	151.7	0.07	113.10	113.17	74.6
	11	132.6	0.17	70.28	70.45	53.1
	12	18.4	—	26.85	26.85	145.9
1983	1	24.3	—	6.92	6.92	28.5
	2	77.5	—	28.82	28.82	37.2
	3	124.7	—	91.28	91.28	73.2
	4	157.9	—	139.77	139.77	88.5
	5	107.5	—	59.49	59.49	55.3
	6	180.1	0.07	111.76	111.83	62.1
	7	171.1	0.20	111.55	111.75	65.3
	8	108.3	0.17	86.18	86.35	79.7
	9	296.3	0.20	169.02	169.22	57.1
	10	119.2	—	76.32	76.32	64.0
	11	52.7	0.14	32.80	32.94	62.5
	12	4.2	—	9.86	9.86	234.8
1984	1	39.7	—	6.58	6.58	16.6
	2	82.9	0.07	36.37	36.44	44.0
	3	55.1	0.09	42.54	42.63	77.4
	4	62.5	—	39.94	39.94	63.9
	5	55.7	—	22.27	22.27	40.0
	6	207.2	0.36	124.55	124.91	60.3
	7	109.2	0.34	81.26	81.60	39.4
	8	20.7	—	8.38	8.38	40.5
	9	56.0	—	1.23	1.23	2.2
	10	78.6	—	4.48	4.48	5.7
	11	43.3	—	4.82	4.82	11.1
	12	62.3	—	13.33	13.33	21.4

25°							
B Type				C Type			
流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)	流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)
地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total		地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total	
0.23	11.98	12.21	34.1	—	14.53	14.53	40.6
—	5.90	5.90	21.1	—	6.41	6.41	23.0
0.11	35.81	35.92	47.1	—	30.22	30.22	39.6
1.23	101.56	102.79	79.4	0.44	101.37	101.81	78.7
0.74	51.03	51.77	47.1	—	54.76	54.76	49.8
1.33	88.20	89.53	48.9	0.12	86.08	86.20	47.1
0.81	91.12	91.93	63.2	—	91.56	91.56	62.9
1.82	127.13	128.95	85.2	0.20	129.00	129.20	85.3
5.73	233.78	239.51	69.0	1.33	231.73	233.06	67.2
1.72	110.24	111.96	73.8	0.25	111.42	111.67	73.6
1.48	71.47	72.95	55.0	0.15	73.60	73.75	55.6
—	25.35	25.35	137.8	—	25.61	25.61	139.2
—	7.50	7.50	30.9	—	9.75	9.75	40.1
0.81	23.36	24.17	31.2	—	21.77	21.77	28.1
0.89	85.68	86.57	69.4	—	78.61	78.61	63.0
2.14	134.81	136.95	86.7	—	135.80	135.80	86.0
1.48	58.76	60.24	56.0	0.07	59.86	59.93	55.7
2.29	109.51	111.80	62.1	0.15	109.74	109.89	61.0
1.62	110.73	112.35	65.7	0.25	110.81	111.06	64.9
0.79	85.27	86.06	79.5	0.07	89.29	89.36	82.5
2.26	164.29	166.55	56.2	1.48	161.41	162.89	55.0
0.55	80.45	81.00	68.0	—	82.20	82.20	69.0
0.24	33.92	34.16	64.8	—	33.75	33.75	64.0
—	11.56	11.56	275.2	—	11.97	11.97	285.0
—	9.62	9.62	24.2	—	8.02	8.02	20.2
0.76	29.87	30.63	36.9	0.12	28.11	28.23	34.1
0.12	37.75	37.87	68.7	—	36.59	36.59	66.4
0.61	37.27	37.88	60.6	—	38.24	38.24	61.2
0.61	26.73	27.34	49.1	—	24.62	24.62	44.2
1.08	119.51	120.59	58.2	0.12	112.25	112.37	54.2
1.20	80.82	82.02	75.1	1.59	90.70	92.29	84.5
—	10.42	10.42	50.3	—	11.77	11.77	56.9
0.36	3.75	4.11	7.3	—	1.20	1.20	2.1
0.27	10.62	10.89	13.9	—	3.35	3.35	4.3
—	9.17	9.17	21.2	—	4.35	4.35	10.0
—	22.49	22.49	36.1	—	15.28	15.28	24.5

Table 3. つづき (Continued)

年 Year	月 Month	降 水 量(P) Precipitation (mm)	Slope			
			A Type			
			流 出 量 (R) Runoff (mm)			流 出 率 Runoff percentage R/P (%)
			地 表 流 出 Surface runoff	地 下 流 出 Seepage	計 Total	
1982	1	35.8	—	4.98	4.98	13.9
	2	27.9	—	1.71	1.71	6.1
	3	76.3	—	28.18	28.18	36.9
	4	129.4	—	98.12	98.12	75.8
	5	110.0	—	50.68	50.68	46.1
	6	183.0	—	78.76	78.76	43.0
	7	145.5	—	86.40	86.40	59.4
	8	151.4	—	131.50	131.50	86.9
	9	347.2	—	230.44	230.44	66.4
	10	151.7	—	103.23	103.23	68.0
	11	132.6	—	64.00	64.00	48.3
	12	18.4	—	26.89	26.89	146.1
1983	1	24.3	—	5.88	5.88	24.2
	2	77.5	—	19.50	19.50	25.2
	3	124.7	—	83.07	83.07	66.6
	4	157.9	—	137.92	137.92	87.3
	5	107.5	—	55.36	55.36	51.5
	6	180.1	0.11	109.39	109.50	60.8
	7	171.1	0.11	108.30	108.41	63.4
	8	108.3	—	87.15	87.15	80.5
	9	296.3	0.38	152.38	152.76	51.6
	10	119.2	—	72.51	72.51	60.8
	11	52.7	—	28.53	28.53	54.1
	12	4.2	—	8.89	8.89	211.7
1984	1	39.7	—	6.61	6.61	16.6
	2	82.9	0.32	26.21	26.53	32.0
	3	55.1	—	37.18	37.18	67.5
	4	62.5	—	37.99	37.99	60.8
	5	55.7	—	24.28	24.28	43.6
	6	207.2	—	115.62	115.62	55.8
	7	109.2	0.21	86.60	86.81	79.5
	8	20.7	—	9.92	9.92	47.9
	9	56.0	—	2.32	2.32	4.1
	10	78.6	—	6.39	6.39	8.1
	11	43.3	—	3.87	3.87	8.9
	12	62.3	—	12.09	12.09	19.4

35°							
B Type				C Type			
流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)	流出量 (R) Runoff (mm)			流出率 Runoff percentage R/P (%)
地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total		地表流出 Surface runoff	地下流出 Seepage	計 Total	
—	7.50	7.50	20.9	—	10.69	10.69	29.9
—	3.52	3.52	12.6	—	5.02	5.02	18.0
—	22.76	22.76	29.8	—	25.05	25.05	32.8
0.14	96.05	96.19	74.3	—	97.72	97.72	75.5
—	49.43	49.43	44.9	—	47.95	47.95	43.6
—	77.39	77.39	42.3	—	79.13	79.13	43.2
—	84.14	84.14	57.8	—	83.76	83.76	57.6
0.11	135.93	136.04	89.9	0.11	142.10	142.21	93.9
1.09	231.64	232.73	67.0	4.62	229.57	234.19	67.5
—	102.41	102.41	67.5	—	104.32	104.32	68.8
—	63.64	63.64	48.0	—	69.21	69.21	52.2
—	26.63	26.63	144.7	—	28.25	28.25	153.5
—	7.77	7.77	32.0	—	9.91	9.91	40.8
—	16.38	16.38	21.1	—	18.13	18.13	23.4
—	75.49	75.49	60.5	—	69.03	69.03	55.4
—	135.90	135.90	86.1	0.16	133.18	133.34	84.4
—	54.51	54.51	50.7	—	55.05	55.05	51.2
0.33	102.78	103.11	57.3	—	105.09	105.09	58.4
0.22	104.46	104.68	61.2	0.19	107.45	107.64	62.9
0.57	88.23	88.80	82.0	1.63	96.08	97.71	90.2
2.18	141.27	143.45	48.4	—	138.12	138.12	46.6
—	75.08	75.08	63.0	—	85.34	85.34	71.6
—	28.53	28.53	54.1	—	32.74	32.74	62.1
—	11.23	11.23	267.4	—	12.05	12.05	286.9
—	7.05	7.05	17.8	—	7.50	7.50	18.9
0.08	22.94	23.02	27.8	0.21	25.53	25.74	31.0
0.05	30.77	30.82	55.9	—	32.19	32.19	58.4
0.10	35.01	35.11	56.2	—	34.27	34.27	54.8
0.16	26.10	26.26	47.1	0.10	25.85	25.95	46.6
1.22	106.91	108.13	52.2	0.43	102.41	102.84	49.6
0.95	91.51	92.46	84.7	—	98.23	98.23	90.0
—	11.75	11.75	56.8	—	13.10	13.10	63.3
—	2.25	2.25	4.0	0.35	4.90	5.25	9.4
—	6.64	6.64	8.4	—	10.68	10.68	13.6
—	3.93	3.93	9.1	—	7.85	7.85	18.1
0.13	10.84	10.97	17.6	—	16.88	16.88	27.1

Table 4. 年間の傾斜別・
Annual water balance

年 Year	降水量(P) Precipitation (mm)	流出量(R) Runoff (mm)	Slope 15°				
			A Type	B Type	C Type		
1982	1509.0	地表流出 (Rs) Surface runoff	5.62	2.45	—		
		地下流出 (R _g) Seepage	1000.03	1015.01	1031.00		
		計 (R) Total	1005.65	1017.46	1031.00		
		流出率 R/P Runoff percentage (%)	66.6	67.4	68.3		
		蒸発散量 (E) Evapo-transpiration (mm)	503.35	491.54	478.00		
		1983	1423.9	地表流出 (Rs) Surface runoff	7.05	3.60	—
		地下流出 (R _g) Seepage	958.74	981.49	1003.16		
計 (R) Total	965.79	985.09	1003.16				
流出率 R/P Runoff percentage (%)	67.8	69.2	70.5				
蒸発散量 (E) Evapo-transpiration (mm)	458.11	438.00	420.74				
1984	873.1	地表流出 (Rs) Surface runoff	3.59	0.77	—		
		地下流出 (R _g) Seepage	451.13	459.17	474.02		
		計 (R) Total	454.72	459.94	474.02		
		流出率 R/P Runoff percentage (%)	52.1	52.7	54.3		
		蒸発散量 (E) Evapo-transpiration (mm)	418.38	413.16	399.08		

ることがわかる。

また、同一傾斜で土層タイプが異なる場合は、Fig. 9 (4) に例示するように、年間降水量と流出量との間には、はっきりした相違を見出すことができない。

4. 1 降雨ごとの降雨量と流出量

従来の流域試験等で、1 降雨ごとの降雨と流出量について検討されたものは多いが、斜面ライシメーターにおいては、流域試験とは異なり、関係因子が単純であり、モデル的な比較がしやすいので、1982 年の降雨量と流出量の関係について、比較検討を行った。

(1) 流出量の分離

ライシメーターからの流出量を、次のように分離する。

- ① 基底流出量：降雨により、流出量の増加が始まってから、再びもとの流出量に復するまでの期間を、流出期間とし、増加前の流出量が流出期間中継続したとみなした場合の期間中の流出量を、基底流出量とする。

土層条件別水収支
by the different slope and soil condition.

Slope 25°			Slope 35°		
A Type	B Type	C Type	A Type	B Type	C Type
2.40	15.20	2.49	—	1.34	4.73
927.31	953.57	956.29	904.89	901.03	922.77
929.71	968.77	958.78	904.89	902.37	927.50
61.6	64.2	63.5	60.0	59.8	61.5
579.29	540.23	550.22	604.11	606.63	581.50
0.78	13.07	2.02	0.60	3.30	1.98
923.77	905.84	904.96	868.88	841.63	862.17
924.55	918.91	906.98	869.48	844.93	864.15
64.9	64.5	63.7	61.1	59.3	60.7
499.35	504.99	516.92	554.42	578.97	559.75
0.86	5.01	1.83	0.53	2.69	1.09
385.75	398.02	374.48	368.63	355.70	379.39
386.61	403.03	376.31	369.16	358.39	380.48
44.3	46.2	43.1	42.3	41.0	43.6
486.49	470.07	496.79	503.94	514.71	492.62

② 増加流出量：流出期間中の地表流出量を合わせた全流出量から基底流出量を差し引いた量を、増加流出量とする。

流出量の増加が始まってから、もとの流出量に復さないうちに、次の降雨が始まることがあるが、このようなときは、まだかなり流出量の多いうちに、次の流出量増加がある場合、すなわち、ほぼ連続した流出量増加とみられる場合は、合併して計算する。かなり流出量が減少して、当初の流出量に近いような場合には、次の流出量増加開始時で計算を打切る。

斜面ライシメーターの各区画における1降雨ごとの水収支式は、次のように考えられる。

$$P_i = R_i + R_b + E \pm \Delta S \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 P_i ：1降雨の雨量 (mm)

R_i ：増加流出量 (mm)

R_b ：基底流出量 (mm)

E ：蒸発散量 (mm)

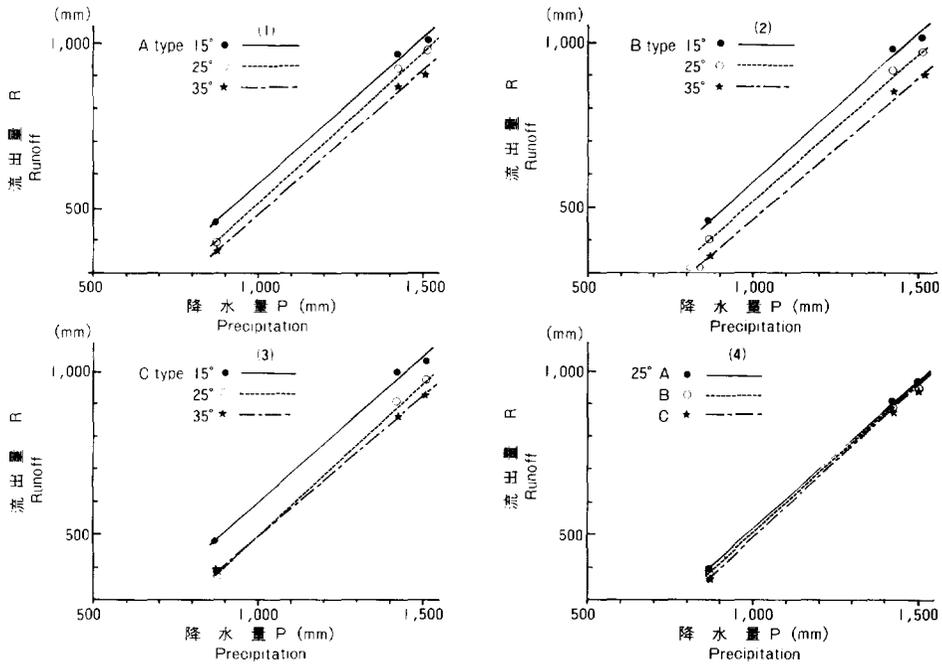


Fig. 9. 年間の土層条件別，傾斜別降水量と流出量
Relation between the annual precipitation and runoff by the different slope and soil condition.

ΔS: 土壌水分変化 (mm)

使用した斜面ライシメーターは，土層がかなり厚いので，無降雨日の続いたあとでは，少量の降雨では，流出量の増加が，ほとんど認められない場合が多い。したがって，流出量の分離作業が可能であるのは，20 mm 程度以上の降雨がある場合に限られる。1982 年に得られた資料で分離が可能であったものは 20 例あり，その諸元は，Table 5 に示すとおりである。

(2) 1 降雨ごとの雨量と増加流出量

既往の流域試験の結果から，提示されている 1 降雨量と直接流出量との関係には，次のような関係式がある。

$$R_d = aP_t^b \dots\dots\dots(2)$$

$$R_d = aP_t - b \dots\dots\dots(3)$$

$$\log R_d = aP_t - b \dots\dots\dots(4)$$

ここで， R_d : 直接流出量 (mm)

P_t : 1 降雨量 (mm)

a, b : 定数

流域試験における直接流出量と，斜面ライシメーターにおける増加流出量とでは，性格が多少異なるが，土壌による浸透と貯留を介して流出してくる点は共通しており，また，ここでとりあげられた降雨は，いずれも，ほぼ 20 mm 以上と比較的大きいので，(3) 式の適合性が高いものと推測される。このことは，

既往の研究²⁾においても、明らかにされた例がある。

Table 5 から、土層タイプ B について、傾斜度別に 1 降雨ごとの降水量と増加流出量の関係、および、その回帰直線を、Fig. 10 (1)~(3) に示す。

3 本の回帰直線を比較してみると、Fig. 10 (4) に示すように、傾斜度の大きい方が、1 降雨ごとの増加流出量が少ないことが認められよう。

(3) 1 降雨ごとの 1 時間当たりの流出量

1 降雨ごとの降雨量と 1 時間当たりの流出量との関係を、同じ傾斜度で土層タイプが異なる場合について比較したものを、Fig. 11 (1)~(3) に示す。無降雨日の続いたあとなどで、土層が乾いている場合には、土層タイプと流出量の多少との関係は、必ずしも一定していないが、概して少ない方から A, B, C の順であり、降雨が連続し、流出量が増加するにつれて、逆に A, B, C の順に 1 時間当たりの流出量が多くなり、最大の流出量も、ピークの現れる時間も、同様に A, B, C の順になる傾向が認められる。

降雨終了後は、A: B, C の順に減水が早く、したがって、流出量もまた、少ない方から A, B, C の順となる。

同じ土層タイプで異なる傾斜度の場合には、Fig. 12 (1), (2) に示すように、傾斜度の小さい方が、1 時間当たりの流出量のピーク値が大きくなり、その現れる時間も早いという傾向を示すが、これについては、おって考察を加える。

5. 年蒸発散量とその経年変化

まず、各区画の年蒸発散量を把握し、それらを比較する。Table 4 の水収支表から、(1) 各区画とも、年蒸発散量は、ほぼ 400~600 mm の範囲にあること、(2) 傾斜度が大きくなると、年蒸発散量は増えること、(3) 同一傾斜度の場合、年蒸発散量は、ほぼ等しく土層条件の違いによる差は非常に小さいことがわかる。一方、年流出量は、ほぼ 350~1000 mm の間にあり、傾斜度が大きい区画ほど、小さくなる。また、年蒸発散量の場合と同様に、土層条件が年流出量に及ぼす影響は小さいといえる。

そこで、上述の(2)の結果を定量的に示すため、Table 4 の水収支から年蒸発散量を抜き出し、Table 6 のように、土層条件別に整理した。これから、A タイプの 15° 区と 25° 区および 15° 区と 35° 区の年蒸発散量の差は、それぞれ 40~80 mm, 80~100 mm の範囲にある。同様に、B タイプでは、それらの差は 50~70 mm, 100~140 mm であり、C タイプでは、70~100 mm, 90~140 mm となる。いま、傾斜による年蒸発散量の増加割合を、A, B, C タイプの 15° 区を 1.0 として計算すると、Table 6 に示した下段の値になる。土層条件により、また年により多少の変動はあるが、平均的にみて、25° 区は 15° 区の 1.16 倍、35° 区は 15° 区の 1.24 倍に相当する。

また、各区の年蒸発散量は、1982 年、1983 年そして 1984 年と減少する。そして、1984 年は特に小さく、年蒸発散量は 1982 年より約 100 mm 小さい。このような経年変化は、主として気象条件、特に日射量と降水量の違いに起因すると考えられる。Table 2 にみられるように、1982 年に比較し、1983 年は夏季の日射量が減少しているし、1984 年は、Table 4 からわかるように、年降水量が非常に少なく、1982 年の 60% 弱である。年蒸発散量の経年変化には、以上のような原因が指摘できるが、その詳細については、芝の生育状況も考慮して検討しなければならない。それから、1984 年の少雨年には、土層の乾燥により水分不足が生じ、それが芝の蒸散を制限したことが考えられる。これが、当年の年蒸発散量の大きな減少を引き起こしたと推察される。

Table 5. 1 降雨ごとの
Rainfall and runoff of

降雨 No. Rainfall No.	傾斜度 Slope	降雨開始 Beginning of rainfall	降雨量 Rainfall (P _r) (mm)	増水開始 Beginning of runoff increasing	流出期間 Period of runoff (hr)
		月 日 時 Date		月 日 時 Date	
1	15°	3. 20. 18	20.9	3. 21. 9	222
	25°	"	"	3. 21. 8	"
	35°	"	"	3. 21. 18	"
2	15°	4. 3. 20	21.1	4. 3. 23	243
	25°	"	"	"	"
	35°	"	"	"	"
3	15°	4. 14. 21	85.1	4. 15. 1	147
	25°	"	"	4. 15. 1	"
	35°	"	"	4. 15. 17	"
4	15°	4. 21. 22	22.6	4. 21. 24	170
	25°	"	"	4. 21. 24	"
	35°	"	"	4. 22. 9	"
5	15°	5. 20. 8	40.8	5. 20. 16	256
	25°	"	"	5. 20. 15	"
	35°	"	"	5. 20. 19	"
6	15°	6. 3. 7	40.9	6. 3. 7	257
	25°	"	"	6. 3. 7	"
	35°	"	"	6. 3. 15	"
7	15°	6. 14. 4	40.3	6. 14. 9	116
	25°	"	"	6. 14. 6	"
	35°	"	"	6. 14. 20	"
8	15°	6. 26. 21	38.0	6. 27. 5	171
	25°	"	"	6. 26. 23	"
	35°	"	"	6. 27. 7	"
9	15°	7. 7. 10	28.7	7. 7. 17	230
	25°	"	"	7. 7. 11	"
	35°	"	"	7. 7. 17	"
10	15°	7. 17. 3	51.5	7. 17. 12	186
	25°	"	"	7. 17. 6	"
	35°	"	"	7. 17. 17	"
11	15°	7. 24. 21	73.4	7. 25. 13	170
	25°	"	"	7. 25. 12	"
	35°	"	"	7. 26. 6	"
12	15°	7. 31. 23	93.1	8. 1. 9	193
	25°	"	"	8. 1. 7	"
	35°	"	"	8. 1. 16	"

雨量と流出量。（Bタイプ，1982）

every storm in the sloping lysimeter. (B type, 1982).

流出量 (R) Runoff (mm)					増加流出量 (R _f) Increased runoff	最大1時間 雨 Maximum rainfall per hour	最大1時間 流出量 Maximum runoff per-hour
地表流出 Surface runoff (R _s)	地下流出 (R _G) Seepage			計 Total			
	基底流出 (R _b) Base runoff	増加地下 流出(R _f) Increased seepage	小計 Total				
①	②	③	④=②+③	⑤	①+③	(mm/hr)	(mm/hr)
0.12	9.99	3.59	13.58	13.70	3.71	5.5	0.12
0.12	9.99	5.04	15.03	15.15	5.16	"	0.21
—	4.44	5.89	10.33	10.33	5.89	"	0.08
—	7.29	0.01	7.30	7.30	0.01	1.2	0.03
—	8.51	0.01	8.52	8.52	0.01	"	0.03
—	6.08	0.06	6.14	6.14	0.06	"	0.04
0.30	8.82	65.42	74.24	74.54	65.72	18.0	6.36
1.23	8.09	66.69	74.78	76.01	67.92	"	5.33
0.14	8.09	62.72	70.81	70.95	62.86	"	3.30
0.07	10.20	2.50	12.70	12.77	2.57	4.1	0.11
0.30	10.20	1.63	11.83	12.13	1.93	"	0.15
—	11.05	0.99	12.04	12.04	0.99	"	0.09
0.05	8.96	17.21	26.17	26.22	17.26	13.3	0.29
0.44	6.40	16.17	22.57	23.01	16.61	13.0	0.36
—	10.24	10.70	20.94	20.94	10.70	"	0.23
0.18	7.71	32.33	40.04	40.22	32.51	13.0	0.66
0.84	9.00	31.00	40.00	40.84	31.84	"	0.58
—	9.00	29.86	38.86	38.86	29.86	"	0.47
0.09	5.80	3.96	9.76	9.85	4.05	7.6	0.08
0.12	4.64	4.34	8.98	9.10	4.46	"	0.27
—	5.22	2.48	7.70	7.70	2.48	"	0.11
0.28	14.54	21.60	36.14	36.42	21.88	4.3	0.60
0.37	12.83	17.25	30.08	30.45	17.62	"	0.44
—	10.26	14.38	24.64	24.64	14.38	"	0.37
—	8.05	2.32	10.37	10.37	2.32	6.6	0.08
0.15	9.20	1.23	10.43	10.58	1.38	"	0.27
—	10.35	0.02	10.37	10.37	0.02	"	0.06
0.05	10.23	5.91	16.14	16.19	5.96	11.2	0.05
0.22	9.30	6.06	15.36	15.58	6.28	"	0.34
—	9.30	2.68	11.98	11.98	2.68	"	0.04
0.07	14.45	41.84	56.29	56.36	41.91	7.7	1.78
0.44	12.75	40.63	53.38	53.82	41.07	"	1.44
—	14.45	35.24	49.69	49.69	35.24	"	0.94
0.07	16.41	79.88	96.29	96.36	79.95	26.0	6.41
1.16	16.41	88.40	104.81	105.97	89.56	"	8.02
0.11	21.23	91.53	112.76	112.87	91.64	"	7.62

Table 5. つづき (Continued)

降雨 No. Rainfall No.	傾斜度 Slope	降雨開始 Beginning of rainfall	降雨量 Rainfall (P_i) (mm)	増水開始 Beginning of runoff increasing	流出期間 Period of runoff (hr)
		月 日 時 Date		月 日 時 Date	
13	15°	8. 17. 0	13.2	8. 17. 2	216
	25°	"	"	8. 17. 6	"
	35°	"	"	8. 17. 5	"
14	15°	8. 26. 13	46.1	8. 27. 4	203
	25°	"	"	8. 26. 14	"
	35°	"	"	8. 26. 22	"
15	15°	9. 10. 12	228.4	9. 10. 13	228
	25°	"	"	9. 10. 13	"
	35°	"	"	9. 10. 13	"
16	15°	9. 23. 9	83.9	9. 23. 23	207
	25°	"	"	9. 23. 23	"
	35°	"	"	9. 24. 7	"
17	15°	10. 8. 3	63.1	10. 8. 23	189
	25°	"	"	10. 8. 13	"
	35°	"	"	10. 9. 2	"
18	15°	10. 19. 22	56.1	10. 19. 23	170
	25°	"	"	10. 20. 1	"
	35°	"	"	10. 20. 1	"
19	15°	11. 7. 11	84.7	11. 7. 13	373
	25°	"	"	11. 7. 12	"
	35°	"	"	11. 7. 14	"
20	15°	11. 30. 5	29.1	11. 30. 8	331
	25°	"	"	11. 30. 6	"
	35°	"	"	11. 30. 9	"

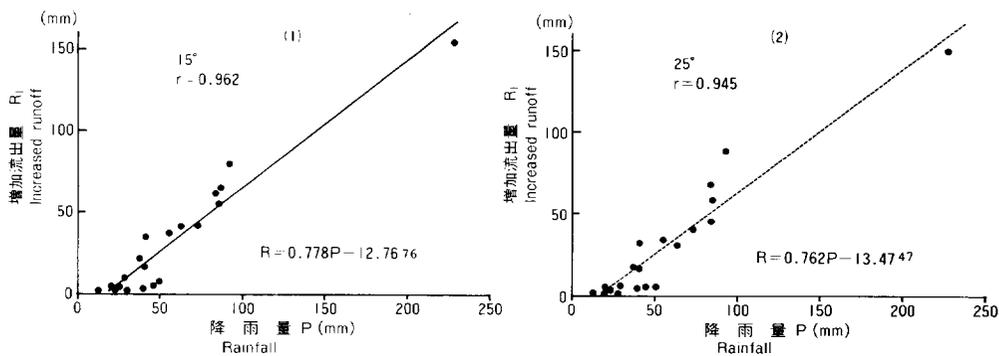
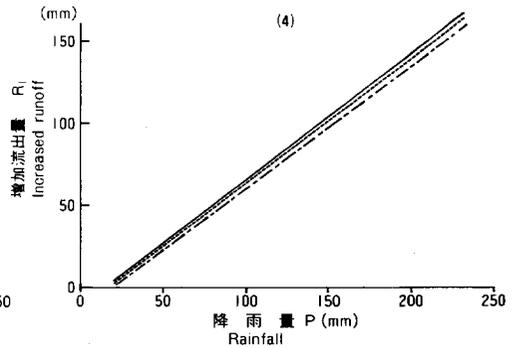
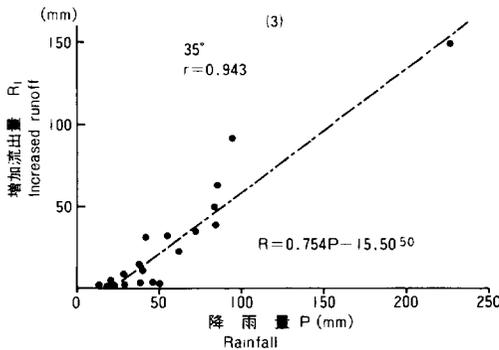


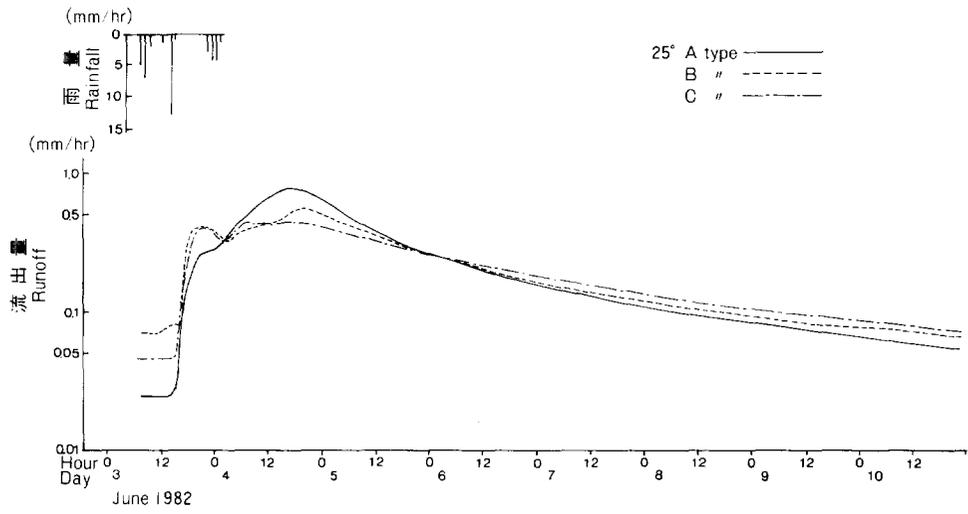
Fig. 10. 1 降雨量ごとの雨量と
Relation between the rainfall of each

地表流出 Surface runoff (R _s) ①	流 出 量 (R) Runoff (R)			計 Total ⑤	増加流出量 (R _i) Increased runoff ①+③	最大1時間 雨 Maximun rainfall per hour (mm/hr)	最大1時間 流 出 量 Maximum runoff per-hour (mm/hr)
	地 下 流 出 (R _c) Seepage						
	基底流出 (R _b) Base runoff ②	増加地下 流出(R _f) Increased seepage ③	小 計 Total ④=②+③				
—	4.32	0.73	5.05	5.05	0.73	2.6	0.03
0.15	4.32	0.96	5.27	5.42	1.10	"	0.13
—	5.40	0.28	5.68	5.68	0.28	"	0.04
0.09	4.06	6.43	10.49	10.58	6.52	20.3	0.12
0.52	4.06	5.23	9.29	9.81	5.75	"	0.29
—	4.06	4.34	8.40	8.40	4.34	"	0.14
—	9.12	153.80	162.92	162.92	153.80	37.6	24.1
4.45	10.26	144.47	154.73	159.18	148.92	"	21.3
1.03	9.12	147.94	157.06	158.09	148.97	"	23.0
0.05	13.46	63.05	76.51	76.56	63.10	24.1	4.29
1.28	12.42	57.16	69.58	70.86	58.44	24.1	3.26
0.05	15.53	50.13	65.66	65.71	50.18	"	1.80
0.51	12.29	40.65	52.94	53.45	41.16	5.7	1.21
0.69	12.29	29.73	42.02	42.71	30.42	"	0.73
—	12.29	22.76	35.05	35.05	22.76	"	0.51
0.14	9.35	37.34	46.69	46.83	37.48	14.3	1.38
1.03	11.05	33.95	45.00	46.03	34.98	"	1.50
—	10.20	32.25	42.45	42.45	32.25	"	0.87
0.30	13.06	54.83	67.89	68.19	55.13	10.8	0.71
0.74	14.92	44.60	59.52	60.26	45.34	"	0.55
—	13.06	38.82	51.88	51.88	38.82	"	0.40
—	8.28	10.18	18.46	18.46	10.18	14.8	0.06
0.74	6.62	4.78	11.40	12.14	5.52	"	0.20
—	8.28	9.91	18.19	18.19	9.91	"	0.03



増加流出量 (B タイプ, 1982)
storm and increased runoff (B type, 1982).

(1)



(2)

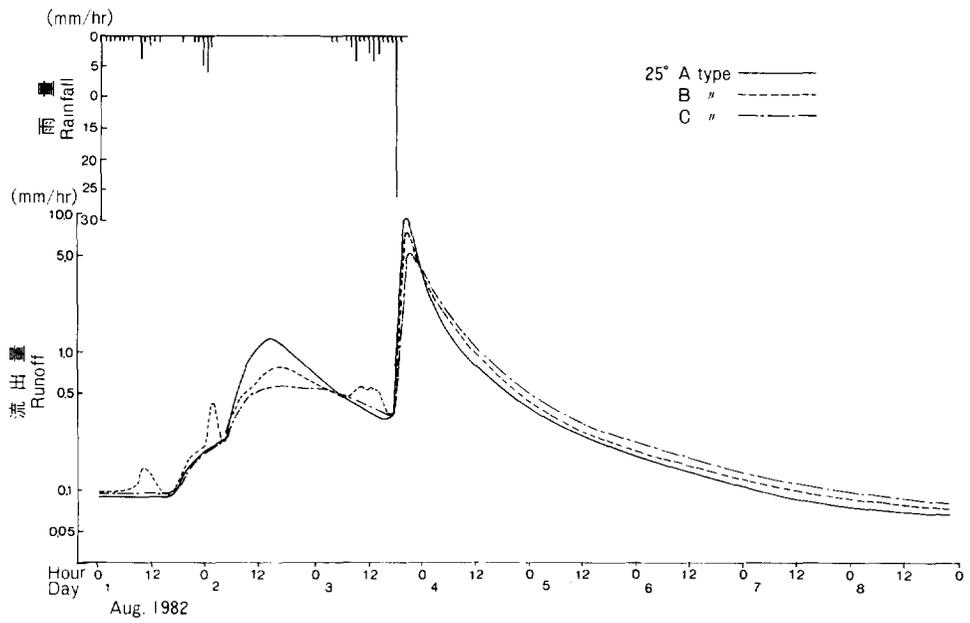


Fig. 11. 土層タイプ別の流出量
Storm hydrograph for different soil layer types.

(3)

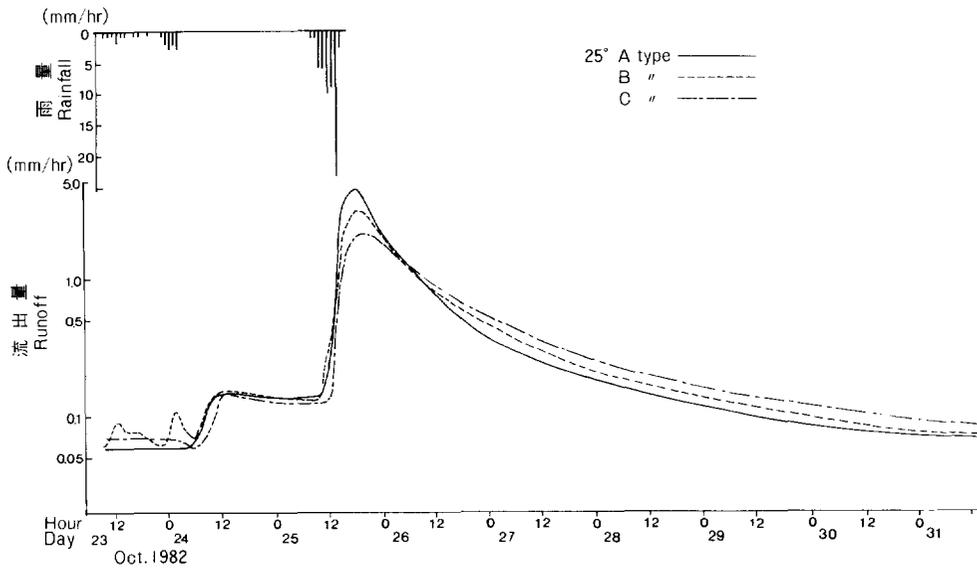


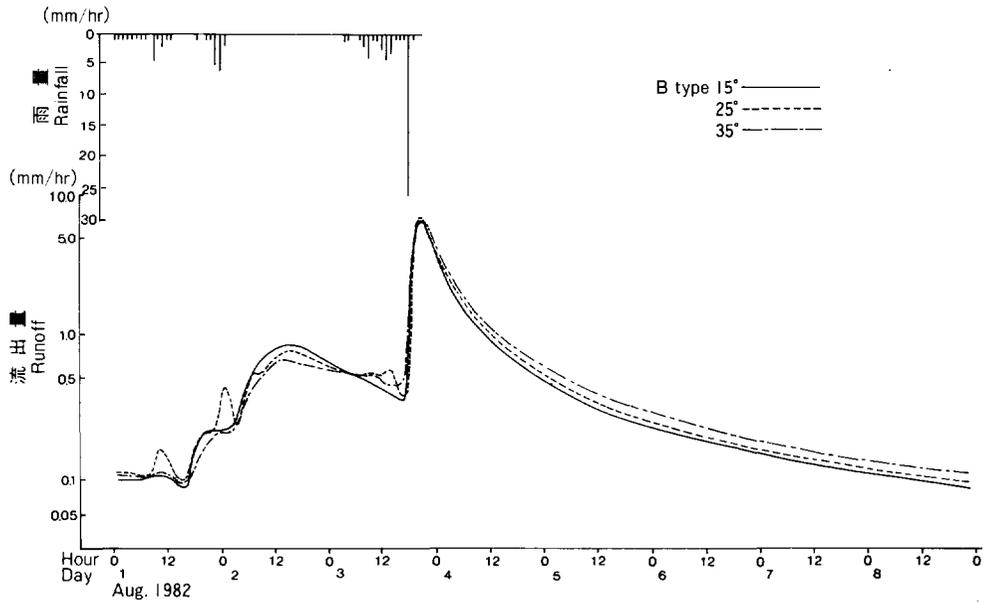
Fig. 11. (つづき) (Continued)

Table 6. 傾斜と年蒸発散量の関係
Evapo-transpiration of the different slope in the different soil layer type.

土層条件 Soil layer type	A type			B type			C type		
	15°	25°	35°	15°	25°	35°	15°	25°	35°
1982 年蒸発散量 (mm) Annual evapo-transpiration	503.35	579.29	604.11	491.54	540.23	606.63	478.00	550.22	581.50
比 ⁽¹⁾ Ratio	1.00	1.15	1.20	1.00	1.10	1.23	1.00	1.15	1.22
1983 年蒸発散量 (mm) Annual evapo-transpiration	458.11	499.35	554.42	438.00	504.99	578.97	420.74	516.92	559.75
比 ⁽¹⁾ Ratio	1.00	1.09	1.21	1.00	1.15	1.32	1.00	1.23	1.33
1984 年蒸発散量 (mm) Annual evapo-transpiration	418.38	486.49	503.94	413.16	470.07	514.71	399.08	496.79	492.62
比 ⁽¹⁾ Ratio	1.00	1.16	1.20	1.00	1.14	1.25	1.00	1.24	1.23

Note) (1) A, B, C各タイプの15°区の年蒸発散量を1としたときの比
Ratio of annual evapo-transpiration let the annual evapo-transpiration of 15° section replaced by 1.

(1)



(2)

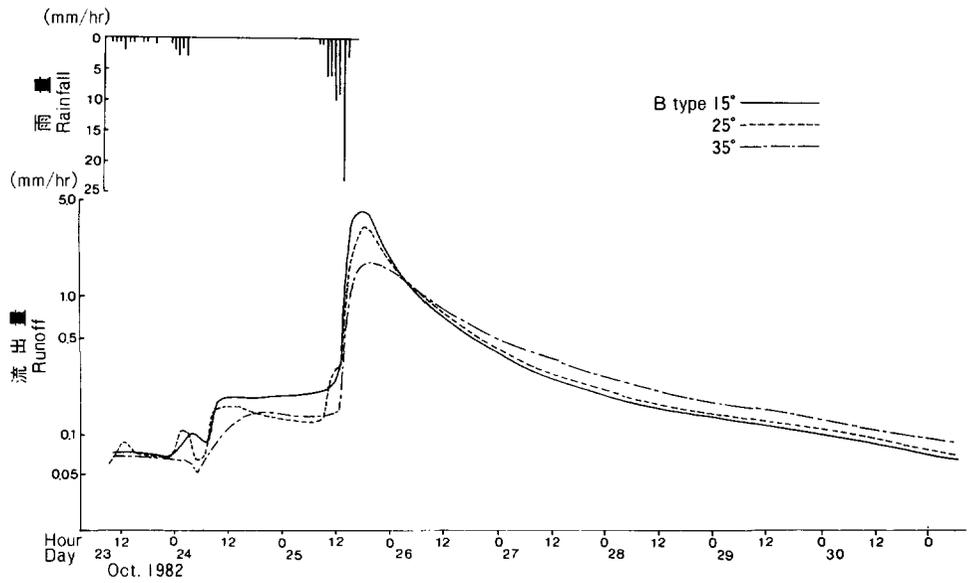


Fig. 12. 傾斜別の流出量
Storm hydrograph for different slope.

以上のように、年蒸発散量は傾斜度の増大とともに大きくなり、おおむね 400~600 mm の間に入ることが知られた。そこで次に、草地の蒸発散量に関する既往データと比較し測定精度を検証する。わが国のライシメーターにおける測定を対象とすると、草地の蒸発散量は Table 7 のように整理される。これから、草地の年蒸発散量は、414.4 mm から 856.4 mm まで相当な幅があることがわかる。これは、気象・土壌・植生条件の違いによると考えられる。そして、当ライシメーターと大体等しい傾斜度のもものでは、年蒸発散量が 400 mm から 700 mm にあるとみなすことができよう。したがって、当ライシメーターで推定された年蒸発散量 400~600 mm は妥当な値であることがわかる。

しかし、Table 7 から知られるように、傾斜別に測定されているのは、上村ら⁶⁾の 1 例にすぎず、この表から、傾斜度と蒸発散量に関して、一定の傾向を見出すことはできない。

また、上村ら⁶⁾は、年蒸発散量と傾斜との間には、整然とした関係が認められないと報告している。当ライシメーターとは距離的に近いが、明確な差が現れなかったのは、傾斜度が 2°~15° と小さいことにも原因があると推察された。

6. 年蒸発散量と年降水量および年可能蒸発散量との関係

年蒸発散量の年降水量および年可能蒸発散量に対する割合を調べる。いま、年降水量に対する年蒸発散量の割合を、Table 4 から計算すると、1982 年、1983 年は、ほぼ 30~40% の範囲にあり、傾斜が大きいほど、その割合も大きい。したがって、Table 4 からわかるように、年流出率は、ほぼ 60~70% の間に入り、傾斜が大きいほど小さくなる。しかし、少雨年の 1984 年は、その割合が前 2 年間とは大きく異なる。すなわち、年蒸発散率は、45~60% と 15~20% 程度増大した。この様子を、35° 区の A, B, C タイプについて、Fig. 13 に示した。このように、土層のタイプに関係なく、1984 年には、年蒸発散率が増大し、しかも、その増加割合もほとんど等しいことがわかる。このことは、15° 区、25° 区についても認められる。年流出率は、この逆で、1984 年には 20% 程度小さくなる。

これらのことは、前述したように 1984 年の降水量が 1982 年、1983 年の 60% 程度であったことに起因する。そして、1984 年の年蒸発散量は、1982 年より約 100 mm 減少しているにもかかわらず、年蒸発散率が増大しているのは、それ以上に流出量の減少が大きいためである。ちなみに、1984 年の流出量は、1982 年の流出量より 500~600 mm 小さくなっている。したがって、少雨年には、年蒸発散量の減少量が年流出量の減少量より小さいため、結果的に年蒸発散率は大きくなることがわかった。

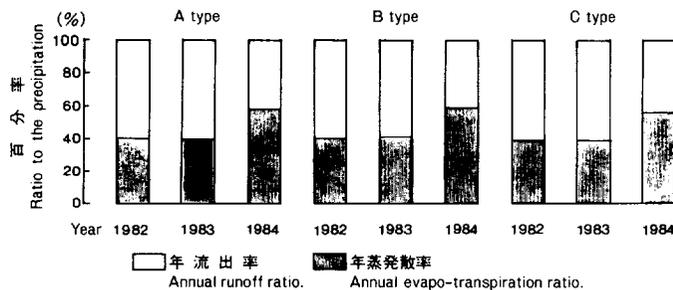


Fig. 13. 35° 区における年蒸発散率の径年変化
A secular change of annual evapo-transpiration ratio in 35° section.

Table 7. 草地の
Annual evapo-transpiration

ライシメーターのタイプ Type of lysimeter	諸 元 Structure	草 種 Vegetation cover type
斜面ライシメーター Sloping lysimeter	傾斜 40° Slope 長さ×幅×深さ Length Width Depth 10m×3m×2m	オーチャードグラスほか (<i>Dactylis curvula</i> L.; Orchard grass. etc.)
斜面ライシメーター Sloping lysimeter	傾斜 11°20' Slope 長さ×幅×深さ Length Width Depth 6.08m×1.5m×1.0m	オーチャードグラス, チモシー, イタリアンライグラス (<i>Dactylis curvula</i> L.; Orchard grass., <i>Phleum pratense</i> L.; Timothy., <i>Lolium</i> <i>multiflorum</i> Lam.; Italian ryegrass. etc.)
斜面ライシメーター Sloping lysimeter	傾斜 2°, 5°, 7° Slope 10°, 15° 長さ×幅×深さ Length Width Depth 10m×2.5m×2.0m	オーチャードグラス, ラジノクロ パー (<i>Dactylis curvula</i> L.; Orchard grass., <i>Trifolium repens</i> L.)
斜面ライシメーター Sloping lysimeter	傾斜 30° Slope 長さ×幅×深さ Length Width Depth 4.5m×1.63m×1.04m	ケンタッキー31 フェスク ⁽⁶⁾ (<i>Festuca elatior</i> L. var. <i>arundinacea</i> ; Kentucky 31 Fescue.)
斜面ライシメーター Sloping lysimeter	傾斜 15° Slope 長さ×幅×深さ Length Width Depth 3m×2m×1.2m	トールフェスク, バーミュタグラ ス (<i>Festuca elatior</i> L. var. <i>arundinacea</i> ; Tall fescue., <i>Cynodon dactylon</i> Pers.; Bermuda grass.)
ウェイニングライシメーター Weighing lysimeter	傾斜 0° Slope 長さ×深さ Diameter Depth 2m×2m	イタリアンライグラス (<i>Lolium multiflorum</i> Lam.; Italian ryegrass.)

(Note) (1) 1973年12月から1976年11月までの3年間の平均値 Average value of the term Dec.1973~Nov.1976.
 (2) No. 1 (ローム土)における5年間の平均値 Average value of five years in the loam soil (No.
 (3) No. 4 (砂土) " " " " " " (No.
 (4) ローム植生区の2°, 5°, 7°, 10°, 15°の平均値 " " of the slope 2°, 5°, 7°, 10°, 15° section
 (5) 砂土植生区の " " " " " " "
 (6) 逐次, 雑草(メヒシバ, エノコログサ, カヤツリソウなど)に占有されていった。Successively occupied
 (7) トールフェスク区の7年間の平均値 Average value of 7 years in the Tall fescue vegetation.
 (8) バーミュダグラス区の " " " " " " in the Bermuda grass vegetation.

年 蒸 発 散 量

of grass land.

測定期間 Period	年降水量(P) Annual precipitation (mm)	年蒸発散量(E) Annual evapo- transpiration(mm)	年蒸発散率 (E/P) Ratio	備 考 Remarks (Reference)
1973~1976	1193.7 ⁽¹⁾	414.4 ⁽¹⁾	0.347	岩崎ら ⁴⁾
1971~1975 ~1975	1668.6 ⁽²⁾ 1697.9 ⁽³⁾	856.4 ⁽²⁾ 621.2 ⁽³⁾	0.507 0.395	Shibuya ら ¹²⁾
1979 1979	1305.4 ⁽⁴⁾ 1306.4 ⁽⁵⁾	800.4 ⁽⁴⁾ 636.2 ⁽⁵⁾	0.613 0.487	上村ら ⁶⁾
1977	1492.0	568.9	0.381	近嵐ら ²⁾
1976~1982 1976~1982	1166. ⁽⁷⁾ 1166. ⁽⁸⁾	647 ⁽⁷⁾ 474 ⁽⁸⁾	0.555 0.407	山崎ら ¹⁴⁾
1980 1981		566.1 538.9		Nakagawa ⁹⁾

1).

4).

in the loam soil vegetation.

in the sand vegetation.

by weed.

次に、年蒸発散量と可能蒸発散量の関係を調べる。可能蒸発散量は、(5)式で与えられるハモン式を用いて推定した。

$$E_p = 0.14 D_0^2 q_t \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 E_p : 可能蒸発散量 mm, D_0 : 日照時間 (12 hr/day), q_t : 月平均気温に対する飽和絶対湿度 (g/m^3)。

Table 2 の月平均気温から、各年の月可能蒸発散量を計算したものが、Table 8 である。ハモン式は気温の関数であるため、年可能蒸発散量は気温の低かった1983年で、767.6 mm と小さく、夏季に高温に推移した1984年が最大で、812.6 mm であった。そこで、年可能蒸発散量に対する各区の年蒸発散量の割合を求めると、当然、傾斜度の大きい区の割合が大きくなる。具体的には、1982年が0.610~0.774の範囲、1983年、1984年が、それぞれ0.548~0.754, 0.491~0.633の幅を示し、年々その値域は減少する。1984年の少雨年を除くと、年蒸発散量は年可能蒸発散量の60~80%程度であると見積ることができる。そして、この幅は傾斜の違いによる蒸発散量の違いに起因する。

7. 傾斜および土層条件が水収支に及ぼす影響

5. 6 では各区の年蒸発散量の実態を調べ、区間の差異を比較、検討した。そこで次に、傾斜により蒸発散量に違いが生じた原因について、考察を加える。その原因をよりの確かかつ定量的に把握するには、蒸発散量の季節変化も含めて解析するのが、望ましいと考えられる。しかし、ライシメーター土層の土壌水分が測定されていないため、短期的な水収支計算ができないので、年間量に基づいて議論する。

(1) 傾斜が蒸発散に及ぼす影響

ここでは、蒸発散に影響を及ぼすと考えられるいくつかの因子を取り上げ、その影響度を検討する。

最初に斜面に到達する放射エネルギー量について調べる。蒸発散は水が水蒸気になる現象なので、それには熱エネルギーが必要である。周知のとおり、それは、太陽からの放射エネルギーに強く依存しており、斜面への入射量の多少が蒸発散の大小に直接的に影響すると考えられる。すなわち、斜面の受ける日射量は、蒸発散を支配する重要な因子といえる。

斜面の日射量は、傾斜により変化することは明白であり、その推定法として、いくつかの方法^{7),8),10)}が提案されている。本報では、紙井⁵⁾の計算結果を利用して、斜面ライシメーター各区の年日射量を比較する。紙井が誘導した推定式は、斜面ライシメーターが受ける日射量を知ることが目的として開発された。これは、基本的には従来の方法と同様で、日射量は直達成分と散乱成分に分離して計算される。しかし、実測水平面日射量から直達日射量を分離するのに、日照率を用いる点に特徴がある。

Table 8. ハモン式による月可能蒸発散量
Monthly potential evapo-transpiration estimated by Hamon equation
(Unit mm)

年 Year	月 Month												計 Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1982	19.8	18.8	35.0	51.0	103.5	106.8	120.6	132.1	81.6	57.0	35.4	21.7	783.3
1983	17.7	21.0	34.7	63.6	91.1	102.6	121.2	124.9	87.0	51.2	32.1	20.5	767.6
1984	17.1	18.0	31.6	52.2	91.8	109.8	146.8	143.8	91.5	56.1	31.2	22.9	812.6

その結果、1980年の農土試（筑波）における15°、25°、35°の南斜面の日射量は、Table 9のように、まとめられる。農土試と当試験地は直線距離で20 km 離れており、放射条件は若干異なると考えられるが、一つの試算値として、これを本ライシメーターの斜面日射量とみなした。なお、表中の水高で示された年日射量は、次式で与えられる水の蒸発潜熱を用いて換算した。

$$l = 597 - 0.6 t \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 l ：水の蒸発潜熱 (cal/g), t ：気温 (°C)

(6)式中の気温には、1982～1984年の平均気温14.5°Cを代入した。Table 2に示した当試験地の気象露場の日射量から年日射量を計算すると、1983年が1615 mm, 1984年が1682 mmとなる。これらの値は、Table 9の傾斜0°の年日射量に相当するが、露場観測値の方が年間で30～100 mm程度小さい結果であった。この差は測定場所、測定年が異なることにも起因していることを考慮すると、Table 9の斜面日射量は、ほぼ妥当であると考えられる。

そうするとTable 9から、年直達日射量は傾斜の増大とともに大きくなり、年散乱放射量は逆に小さくなるのがわかる。そして、年日射量が傾斜とともに大きくなるのは、直達日射量の増大によることが知られる。また、年日射量は、15°区、25°区、35°区で、それぞれ1863 mm, 1911 mm, 1914 mmとなり、15°区と25°区の差が48 mm, 25°区と35°区の差がわずか3 mmとなる。これらは斜面上の単位面積当たりの日射量なので、水収支計算で用いられている単位水平面積当たりに換算する必要がある。Table 9中の(4)を単位水平面積当たりに換算した日射量は、同表の(5)のとおりで、15°区、25°区、35°区の年日射量は、それぞれ1929 mm, 2109 mm, 2337 mmとなる。15°区と25°区の差は180 mm, 25°区と35°区の差は228 mmとなり、大きな開きが生ずる。この傾斜間の年日射量の差は、Table 5の傾斜別年蒸発散量の差を、はるかに上回っている。しかし、日射量の全部が蒸発散に利用されるわけではない。そこで、蒸発散に利用可能な放射量としての純放射量での比較を試みる。いま、斜面ライシメーターの反射率（アルベド）を25%と置くと、服部³⁾が提案した次式から純放射量が計算される。

$$\frac{R_N}{Q} = 0.81 \exp(-0.0275 \alpha) \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 R_N ：純放射量 (ly), Q ：日射量 (ly), α ：アルベド (%)

そうすると、各区の推定年純放射量は、15°区が786 mm, 25°区が859 mm, 35°区が952 mmとなり、15°区と25°区の差は73 mm, 25°区と35°区の差は93 mmとなる。その結果、年日射量の区間差に比べ大幅に減少し、Table 6に示した傾斜別蒸発散量の差に近づいたことがわかる。さらに、蒸発散

Table 9. 傾斜別の斜面日射量 (1980)
Solar radiation of the slope by the different slope.

傾斜 Slope	年直達放射量 Annual direct radiation (1) (ly/year)	年散乱放射量 Annual scatt- ering radiation (2) (ly/year)	年日射量 Annual solar radiation (3) (ly/year)	年日射量 Annual so- lar radiation (4) (mm)	単位水平面積当たり年日射量 Annual solar radiation per unit horizontal area (5) (mm)
0°	48633	52179	100812	1714	1714
15°	58317	51291	109608	1863	1929
25°	62663	49736	112398	1911	2109
35°	65161	47462	112623	1914	2337

量は純放射量のうちの何割かであることを考慮すると、区間の差はもっと縮むと考えられる。以上の結果は、いくつかの仮定を含む一つの試算にすぎないため、推定値の厳密さには欠ける。しかし、Table 6の蒸発散量の区間差は、斜面が受ける日射量の差から、その大部分が説明できると考えられる。

また、以上の解析は年収支に基づいて行われているので、蒸発散量の季節変化についても、今後検討しなければならない。

気象因子としては、次に風速が指摘される。Fig. 1, Photo 1などからもわかるように、各区の地上高は傾斜により異なり、例えば15°区と35°区では、斜面上端における高さに約2mの差がある。そのため、35°区の風速は他区より大きく、それが蒸発散を促進したことも推察されるが、風速の測定が実施されていないので、その影響を定量的に評価することは困難である。しかし、一般に草地の表面粗度は小さいため、水蒸気輸送における空気力学的抵抗が大きくなり、草地の蒸発散に及ぼす風速の影響は、放射エネルギーより小さいことが指摘されている¹³⁾。この点からすると、Table 6の傾斜別蒸発散量の差の主因とはならないが、影響因子の一つとして指摘する必要があると考えられる。

蒸発面の条件として、各区の芝の地上部現存量、被覆度、活性度などが重要であると考えられるが、1982年から1984年の観測期間中には植生調査が行われていない。そのため、各区の植生条件に差異があったか否かは不明であり、傾斜別蒸発散量の差を植生条件から論ずることはできなかった。ただし、1985年10月に行った芝の地上部刈取り調査によると、各区の地上部現存量にはかなりのバラツキが認められ、蒸発散量との間に一定の関係を求めることは、難しいことがうかがわれた。

(2) 土層条件が水収支に及ぼす影響

当ライシメーターの土層は、A, B, Cタイプの3種からなる。ここでは、この土層条件の違いが蒸発散量および水収支に及ぼす影響を考察する。

土層条件の違いによる年蒸発散量の差は、前述したように、非常に小さく、40mm以下である。そして、A, B, Cタイプにおける大小関係には、規則性は認められないが、15°区では3年間とも年蒸発散量が、 $A > B > C$ となった。

また25°区と35°区では、AタイプとCタイプを比較した場合、年蒸発散量が $A > C$ と $A < C$ となる回数は同じである。したがって、全体的な傾向としては、 $A > B > C$ ということになり、ローム層のAタイプの年蒸発散量が多いと云えそうである。そして、表層に砂混りの層をもつB, Cタイプでは、砂混り層の厚いCタイプの年蒸発散量が小さい傾向を示す。

このように、土層条件の違いが年蒸発散量に明確に出現しないのは、Table 1からもわかるように、上、下層の土壤学性に顕著な差が存在しないためと考えられる。土性は上層がSL、下層がLとなっているが、粗孔隙は下層の方が多いし、透水係数もオーダー的には等しいとみなすことができる。上層に砂を混ぜた効果は、結果的に小さく、ライシメーター土層の透水性、保水性が1層と2層で大差がなかったことに起因すると推察される。もちろん、A, B, Cタイプの違いは皆無ではなく、 $A > B > C$ の傾向が部分的に認められるのは、土層条件の違いを反映していると考えられる。これはローム層の保水性が高いため、蒸発散量が増えたと考えられる。

土層条件と水収支に関しては、SHIBUYAら¹²⁾、上村ら⁶⁾の研究がある。ともに、ローム土と砂土における水収支の違いを、斜面ライシメーターによって解明している。これらの結果によると、ローム土からの蒸発散量は砂土より大きく、年間では200mmを上回る年もある。このような大きな差が生ずるのは、

ローム土と砂土の理学的に大きな違いがあり、土層の水分条件が異なるためと考えられる。

当ライシメーターにおける土層条件の影響は、必ずしも明瞭なものではなかったが、ローム層からなる A タイプの年蒸発散量が大きくなる傾向がうかがわれ、それはローム層の保水性が高いことによると考察された。

8. 土層条件および傾斜度が流出特性に及ぼす影響

ライシメーターからの流出ハイドログラフは、Fig. 11, 12 に示したように、土層条件および傾斜度により若干異なる。その傾向はすべての場合について一定ではないが、その中で卓越したものを取り出し、そのような違いが生ずる原因について考える。その原因を究明するには、土層中における水分状態や移動の様子を知る必要があるが、土層の土壤水分が測定されていないので、その違いを定量的かつ物理的に説明することは、難しいと考えられる。そのため、ここでは、定性的ではあるが、各区の水収支特性、土層の理学的性、既往の研究成果に基づいて、流出ハイドログラフの違いを考察する。

土性の違いによるライシメーターの流出ハイドログラフの差異は、上村ら⁶⁾により報告されている。ローム層からの地下流出量は、砂土層からの流出量に比較し、ピーク流量が大きく、減衰曲線の勾配も急であることが、指摘されている。そして、これはロームと砂土の物理性、特に透水係数の違いの影響が大きいことを述べている。しかし、土壤水の移動機構に基づく解析はなされていない。

(1) 土層条件が流出特性に及ぼす影響

ローム層のみの A タイプと、ローム層上に砂混り層が存在する B, C タイプでは、Fig. 11 にみられるように、降雨時のピーク流量は $A > B > C$ の順であるが、無降雨時の減衰期間の流出量は $A < B < C$ となり、大きさの順が逆になる。このような現象は、傾斜度が等しいことから、土層条件の違いに強く依存していると考えられる。ただし、植生条件については、その調査が十分でないので、各区とも、ほぼ同一であるとして検討を行う。

ローム層のみの A タイプの流出ハイドログラフは、ロームの透水性、保水性を反映しているが、表面に砂混り層をもつ B, C タイプでは、それに砂の理学的性が影響するため、A タイプとは異ったハイドログラフを示すと考えられる。Table 1 にみられるように、B, C タイプの上層は、下層に比べ、砂質であるため、下層のロームより透水性は大きい、保水性は小さいといえる。そのため、降雨停止後も上層から下層への水分移動が継続し、B, C タイプのハイドログラフの減衰勾配は、ゆるくなると考えられる。一方、ローム層のみの A タイプでは、ロームの保水性が高いために、流出量は比較的早く減衰する。そして、保水性が高いゆえに、土層は湿潤で、かつ毛管上昇も大きいので、降雨時には浸透した雨水が早く毛管水帯に到達する。そのため、降雨時の反応は早しい、土壤間隙中の水分は一斉に移動するため、ピーク時の流出量も大きくなると推察される。B, C タイプは、この逆で、上層の保水性が小さく、乾燥も進行しているため、降雨時には、まず土壤水分不足が補われ、その後下方への移動が始まるので、流出の立ち上がりは遅れるとともに、ピーク流出量も小さくなる。以上の説明は、乾燥した土層に降雨があった場合であるが、土層が湿潤な場合には、A, B, C タイプからの流出ハイドログラフは、相当近似すると考えられる。また、流出ハイドログラフの差異は、ローム層と砂質層中の水分分布とその移動形態の違いに起因するため、原因を的確に指摘するには、土壤水分測定に基づく物理的な解析が必要である。これは今後の課題とする。

(2) 傾斜度が流出特性に及ぼす影響

Fig. 12 からわかるように、土層タイプが同じ場合には、ピーク流量は $15^\circ > 25^\circ > 35^\circ$ となる関係が見い出されるが、減衰期間では、その逆に $15^\circ < 25^\circ < 35^\circ$ の順で大きくなる。前者の場合は、土層中の水分状態が影響していると考えられる。すなわち、前述したように、傾斜が大きくなると、単位水平面積からの蒸発散量が大きくなるので、その分だけ傾斜度の大きい区画の水分量は少なく、土層は乾燥していると考えられる。そのため、降雨時には、土層の水分不足量が最初に補われ、それだけ下方への浸透水量は減少し、ピーク流出量が小さくなる。このような傾向は、冬期の蒸発散量が少ない時期には、明瞭に出現しないであろうし、土層が十分に湿潤な場合も、ピーク流量の差は僅少であると考えられる。また、減衰期間に認められる流出量の大小関係は、傾斜の違いによって生ずる土層内の水分分布の違いに起因すると考えられる。すなわち、基底に形成される飽和層、その上の毛管水帯、懸垂水帯の形態とその消長は、傾斜により異なると考えられる。傾斜が大きくなると、斜面下部の飽和層が厚くなること、その圧力勾配が大きくなることのため、減衰期間の流出量は、傾斜が大きいほど大きくなると考えられる。

ここにあげた傾向は一例であり、これと一致しないハイドログラフも多々ある。それらも含めて、流出ハイドログラフの差異を説明するには、土層中の水分移動を、飽和—不飽和運動理論に立て、解析しなければならない。これも今後に残された問題である。

なお、こうした問題のほか、土層の厚さが、斜面と直角方向で 1.75 m と等しくしてあるため、垂直深でみると、 15° 、 25° 、 35° 、で 1 : 1.07 : 1.18 と異なっており、こうした点も流出特性に影響を及ぼしていると考えてよく、併せて今後の検討が必要である。

V 要 約

傾斜地における傾斜度・土層条件の相違が、地表流出・地下水流出・蒸発散量などに及ぼす影響を、定量的に解明するため、斜面ライシメーターに、傾斜度・土層条件の異なる区画を設定し、1982～1984年の3年間にわたり水文観測を行い、比較検討した。

斜面ライシメーターは、1区画の大きさが幅3 m、斜面長6 m、斜面と直角方向の深さが2 mのコンクリート製で、傾斜度は 15° 、 25° 、 35° の3種ある。各傾斜について、関東ロームに砂を加えたもの、および関東ロームだけの2種の土層の割合を変えて、全体で1.75 mの深さに充填した三つの土層タイプがあり、合計9区画からなっていて、表面は芝張りである。

1) 月別の水収支をみると、各土層タイプとも、傾斜度の大きい場合の方が流出量が少なくなる場合が、ほとんどである。一方、同じ傾斜度で土層タイプが異なる場合には、流出量にほとんど差が生じない。

2) 年間の水収支をみると、各土層タイプとも、傾斜度が大きい方が流出量が少なく、傾斜度間の差は50～60 mmであった。また、各傾斜度別に、年間の降水量と流出量との間に、ほぼ線形の相関が認められた。

同じ傾斜度で土層タイプが異なる場合には、年流出量に一定の傾向を示すような影響は、認められなかった。

3) 1降雨ごとの降水量とその降雨による増加流出量を比較してみると、同じ土層タイプでも、傾斜度の大きい方が流出量が少ないことが認められた。一方、同じ傾斜度で土層タイプが異なる場合には、一定の傾向は認められなかった。

4) 各区画の年蒸発散量は、おおむね400～600 mmの範囲にあり、斜面の傾斜が大きくなるほど、大

きくなる。すなわち、15° 区の年蒸発散量を基準にすると、平均的に言って、25° 区は15° 区の1.16倍、35° 区は1.24倍に相当する。

5) 年蒸発散量は年降水量の30~40%程度であるが、少雨年には、その割合が40~60%の範囲まで増大した。また、年蒸発散量は、少雨年を除くと、ハモン式で計算される可能蒸発散量の60~80%の範囲にあった。

6) 斜面の傾斜度の違いによる年蒸発散量の差は、斜面が受け取る日射量の差から、ほとんど説明できることがわかった。

7) ライシメーターの土層条件が年蒸発散量に及ぼす影響は、傾斜の影響より小さく、A, B, Cタイプの大きさに規則性を見出すことは難しい。しかし、全体的には、ローム層のAタイプからの蒸発散量が一番大きくなる傾向が認められた。

8) ローム層のみのAタイプと、砂混り層が存在するB, Cタイプでは、土壤の物理性を反映し、流出ハイドログラフが異なる。Aタイプは降雨への反応が速く、ピーク流量も大きい傾向を示すが、B, Cタイプは、降雨への応答は遅く、ピーク流量も小さい傾向がある。

9) 土層タイプが同じ場合、ピーク流量は傾斜が小さい区の方が大きいですが、ハイドログラフの減衰期間では、逆に、傾斜の小さい区が小さくなる傾向が認められた。その理由としては、土層内の水分分布の違いのほか、土層の垂直深の相違が考えられる。

引用文献

- 1) 近嵐弘栄：流量測定のための自動排水装置の試作。日林誌，60，183~185，(1978)
- 2) 近嵐弘栄・服部重昭・竹内信治：斜面ライシメーターにおける植被別水収支の研究。林試研報，303，1~46，(1979)
- 3) 服部重昭：エネルギー収支からみた森林蒸発散。水利科学，166，1~23，(1985)
- 4) 岩崎勇作・村井 宏（林試東北支）・石井正典（岩手大農）：ライシメーターによる地別別の水士流出実験（I）。88回日林論，401~403，(1977)
- 5) 紙井泰典：水平面日射から斜面日射量を求める一方法。農土試技報 A（土地改良），26，67~95，(1982)
- 6) 上村春美・渋谷勤次郎：斜面流出実験施設の建設・調整及び観測データの解析。農土試技報 A（土地改良），26，39~66，(1982)
- 7) KONDRATYEV, K. Ya. (with the assistance of FEDOROVA, M.P.): Radiation regime of inclined surface. WMO Technical Note, No. 152, (1977)
(大陸上での太陽放射量の分布及び斜面の放射状態。エネルギー関連文献翻訳シリーズ4，農林水産技術会議，(1980)
- 8) 三浦健志・三野 徹・丸山利輔・四方田 稔：傾斜地の日射量分布計算法—傾斜地における温度環境形成機構に関する研究（I）。農土論集，88，1~7，(1980)
- 9) NAKAGAWA, S.: Study of evapotranspiration from pasture. Enviro. Res. Center Papers (The University of Tsukuba), 4, 1~87, (1984)
- 10) 岡上正夫：斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法。日林誌，39，435~437，(1957)
- 11) 林野庁・林業試験場：国有林野土壌調査方法書。林野共済会，47 pp，(1955)
- 12) SHIBUYA, K., KAMIMURA, H. and BANZAI, K.: An experimental study of water balance and soil erosion with sloping lysimeters. Bull. Natl. Res. Inst. Agric. Eng. Japan, 21,

- 1～52, (1981)
- 13) 鈴木雅一：降雨—流出過程における森林の影響. ハイドロロジー, 13, 1～10, (1983)
- 14) 山崎清功・徳留昭一・氏家 勉：傾斜地における土地利用方式が物質の動態に及ぼす影響. 第 1 報. ラインメーターにおける水の動態と収支. 四国農試報, 43, 38～74, (1984)

The Water Balance by the Different Slope and Soil Condition in the Sloping Lysimeter

Hiroei CHIKARASHI⁽¹⁾, Shigeaki HATTORI⁽²⁾, Nobuji TAKEUCHI⁽³⁾ and Yoshio TSUBOYAMA⁽⁴⁾

Summary

Comparative hydrological observations were made to find out the quantitative effect of slope and soil condition on surface runoff, ground water runoff, evapo-transpiration etc.

For this purpose, different slope and soil condition were set up on a sloping lysimeter and 3 years of hydrological observations continued from 1982 to 1984.

The sloping lysimeter is composed of 9 sections and each section is 3.0 m in width, 6.0 m in slope length, 2.0 m in depth perpendicular to the slope, 15°, 25°, 35° in gradient and constructed from water proofed concrete.

Of two soil layers in each inclined concrete box with different depth composition, the upper layer is sandy loam and the lower layer loam. Total depth of soil layer perpendicular to the slope is 1.75m. The surface of the slope is protected by a lawn.

(1) The monthly water balance mostly shows lower runoff in the bigger gradient slope. While the different soil layer type at the same gradient shows almost no difference.

(2) The annual water balance shows lower runoff in a bigger gradient slope by a difference of about 50~60 mm.

Besides, the linear regressions were shown between the precipitation and the runoff in each gradient.

The annual runoff shows no regular influences by the different soil layer type at the same gradient.

(3) To compare with the rainfall amount and the increased runoff (direct runoff) in the case of one rainfall, each plot indicates a lower runoff in a bigger gradient slope. While the different soil layer type of the same gradient shows no fixed tendency.

(4) The annual evapo-transpiration from each section varies from about 400~600 mm and increases together with the increase of slope gradient. That is to say, the ratios of evapo-transpiration from 25° and 35° plots, compared with that of 15° plot, were 1.16 and 1.24, respectively.

(5) The ratios of annual evapo-transpiration to the annual precipitation were in the range of 30~40% and showed the tendency to expansion into the range of 45~60% in a year of small annual rainfall. Moreover, the ratios of the annual evapotranspiration to the annual potential evapo-transpiration estimated by the Hamon equation lay between 60% and 80% except for the year of small annual rainfall.

(6) The difference of the annual evapo-transpiration due to the slope gradient could be almost all part explained by the difference of the amount of solar radiation received by each slope.

(7) The effect of soil layer configuration in the lysimeter on annual evapo-transpiration

Received December 3, 1986

(1)(3)(4) Forest Influences Division

(2) Kansai Branch Station

is less than that of the slope gradient and is so obscure it is difficult to find a fixed relationship between the two. But there was the tendency that annual evapo-transpiration from A type soil layer was larger than those of B and C type soil layers.

(8) The hydrograph obtained from A type soil layer, which forms one loam layer, is different from those of B and C type soil layers consisting of two layers, a sandy loam layer and a loam layer, reflecting the difference of each soil property.

Therefore, there is a rapid rise of water table responding to rainfall in A type soil layer and the peak discharge is larger than those of B and C type soil layers.

(9) The peak discharge from a section in the small slope gradient is larger than that of sections in the big slope gradient under the same soil layer configuration, but the discharge from sections in a small slope gradient is smaller than that from sections in a big slope gradient in the recession period of the hydrograph.

The reason is thought due to the difference of soil moisture distribution in the soil layer and the vertical depth of soil layer.