

山腹斜面の流出機構について (2)

——土壌水の挙動——

福 島 義 宏

The Mechanism of Runoff on a Hillside (2)

Movement of Soil water

Yoshihiro FUKUSHIMA

目 次

要 旨	115	2. 自記々録計による土壌水分	
はじめに	116	i) 1975年7月14~17日の場合	
第1章 土壌水分測定地と測定方法	116	ii) 1974年8月25~31日の場合	
第2章 測定結果とその考察	117	iii) 1973年8月28~29日の場合	
1. 実測値による土壌水分		第3章 総 括	123
i) 1971年10月15日の場合		おわりに	123
ii) 1975年7月10~30日における5		引用文献	123
回の測定値の場合		Résumé	124

要 旨

山腹斜面の流出現象を支配する大きな要因である斜面内の土壌水分の動きを、試料採取による実測値と電気抵抗式の水分計による測定値の変化から考察した。

試験実施場所は琵琶湖東南部の花崗岩より成る山地小流域にある、幅5m・斜面長10mで傾斜16°の自然ライシメーターである。土壌の区分は、humus層が地表下15cmまでで、その間隙率は58.3%、また根圏層は55cmで、55.3%、非根圏層は2m以下に続き、51.5%である。水分計による測定は斜面の上・中・下部で、それぞれ土壌下10・50・100・150・200cmの深さで行なった。結果は次のようになる。

1. 無降雨日が続けば、土壌水分の容積含水率は、土壌層の相違すなわち間隙率の変化にもかかわらず、鉛直方向で、ほぼ同程度の値になる傾向が認められる。
2. 重力水として移動すると考えられる最低の容積含水率は、ほぼ8~10%であった。
3. 本斜面ライシメーターにおいて、地表下2mまでの土壌中に、重力水として含まれ得る最大可能水量は892mmになる。
4. しかし、測定例からは根圏層の飽和度は最大でも50~60%程度であり、実可能水量は3項で述べた値より大きく下回る。
5. humus層内水分の降雨終了後の減少過程は直線型よりも、指数関数型に近い。さらに、斜面の下方に向うに従って、その減少割合が低下するのは、斜面方向と同方向の水分移動が存在することを意味する。

6. 特に直接流出に関係する水分変化は、せいぜい地表下 50cm 程度まで、すなわち根圏層までである。この原因としては、それより下部の土壌層の透水性が悪いと考えるよりも、それより上部で貯留し得る水量が多く、かつ飽和する以前に、斜面方向への流下が始まるためと考えられる。

は じ め に

山地流域の流出現象を支配する主要な場として山腹斜面がある。さらに、山腹斜面における雨水の挙動は、土壌中の水分移動をいかに評価するかという点にある。

筆者は従来、山地の自然斜面において、その表層 (humus) の流出解析を進めてきた。その結果、表層流出量はせいぜい降雨量の 2% 程度であり、他の大部分がそれより下層の土壌中に浸透していること、および不透水層より上の流出は指数関数的であることを述べた。

本報告では、土壌水分の測定値をもとに、降雨の前後における水分変化から、土壌中の水分がどのような挙動をするのかについて考察を行いたい。

第 1 章 土壌水分測定地と測定方法

水分測定を行なった場所は滋賀県東南部に位置する桐生試験流域²⁾である。観測地はこの試験流域内の源頭部で No. 4 と呼ぶ自然ライシメーター内である。

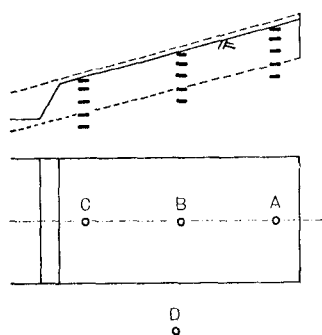


Fig. 1. No. 4 Lysimeter (black circles and thick lines indicate moisture probe)

本ライシメーターは図 1 に示すように、幅 5m、斜面長 10m の斜面の上端・側方をそれぞれ地表下 2m 近くまで、ビニールシートを張った木板で囲まれている。下端側は法勾配 60° に 1.5m までカットしている。斜面勾配は 16° である。なお、本ライシメーターを含む斜面は、この位置より下部で、少し傾斜が緩くなるが、まだ下方へ続く長大斜面であり、その中でみれば、ライシメーターの位置は、斜面上部となる。地質は花崗岩であり、植生はアカマツを主体にヒノキが混じり、樹冠を閉鎖している。

さて、土壌水分測定としては電気抵抗方式を採った。感体は手製の中空ブロックである。これは 6×3cm のステンレス極板を 1.5cm 離して塩化ビニール板に張り付け、その間に現地の土を充めたものである。記録は坂田電気製の 24 点自記々録計でなした。記録時間々隔は 1 時間もしくは 3 時間である。

土壌水分の測定箇所は図 1 に示すように、ライシメーター内斜面の上下方向の中心線に沿って、上端から 1m の距離の点に A 点、中央部に B 点、下端より 1m 上方に C 点とする 3 地点である。すなわち、A-B、B-C 間の斜距離は各 4m となる。また、本ライシメーター外に対照点として D 点を設けた。水分計感体の埋設深は、ライシメーター内で各 10・50・100・150・200cm、対照点で、10

Table 1. Physical Characters of Soil Layers at No. 4 Lysimeter

	Length under surface (cm)	Dry bulk density (g/cc)	Porosity (%)
Humus layer	15	1.10	58.3
Intensive root layer	55	1.18	55.3
Extensive root layer	200<	1.26	51.5

・30・50・100・150cm とした。これは対照点では深さ 150 cm で風化岩に到達したためである。埋設は1971年10月15日に行ない、記録の開始は1972年以降である。水分の実測はソイルサンプラーによる試料採取から行った。

ライシメーター内土壌の物理性は表 1 に示す。

なお、結果的には、A 点の150, 200 cm, および B 点の 150cm, D 点の 50cm の感体には異常があって解析対象からはずした。

第 2 章 測定結果とその考察

1. 実測値による土壌水分

i) 1971年10月15日の場合

図 2 は1971年10月15日にソイルサンプラーを使って採取した試料を測定した各地点での土壌水分を容積含水率で示したものである。また、これは前期降雨から 3 日間経過している。A 点すなわち斜面上部では各深さとも含水率は12~16%, B 点すなわち中部では13~18%, C 点すなわち下部で13~19%, D 点では11~23%となっている。つぎに、含水率の鉛直方向の変化をみる。上部・中部

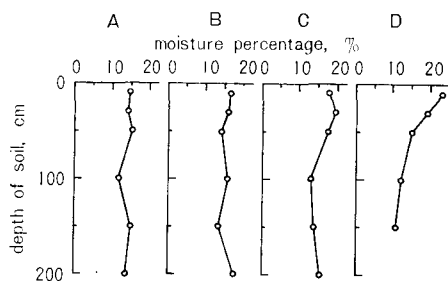


Fig. 2. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Oct. 15th, 1971)

では、多少の差はあるが、ほぼ土壌深に無関係に水分が一定しているようである。これに対して下部では表層近くの含水率が上部・中部に比べて高い。また 10cm・30cm 深の含水率の斜面方向の変化をみても、下部に向うに従って、含水率は高くなっている。一方対照点ではライシメーター内と異なり、地中深くなるほど、含水率は低くなっている。大まかに見れば、斜面上・中部および下部・対照点はそれぞれ似ていると言えるであろう。

ii) 1975年 7 月10~30日における 5 回の測定値の場合

図3-1~3-5 は 1975年 7 月10~30日にかけて、5 回の採土から測定した各地点・深さの含水率である。なお図中の黒丸は同期間中同時に記録を続けた自記々録計について、実測値をもとに、水分計の各感体ごとに校正した計算値による含水率である。この計算値については次節で説明することにする。なお、この一連の測定の時期と日降雨量について図 4 に示す。次に試料採取の日と降雨との関係について述べる。

第 1 回の採土は一連続 27mm の降雨終了後、2 時間後に行った。採土中も小雨がばらつき、土壌は相当湿っていた。第 2 回目は 42mm の降雨終了の 24 時間後に、第 3 回目も 14mm の降雨終了 24 時間後に採土をしている。第 4 回目は、第 3 回の測定後、無降雨状態が 3 日間続いた後であり、土壌は乾燥していた。つぎに、第 5 回目は、第 4 回の測定後 3 日目に 4.5mm の小雨があっただけで、その後 5 日間快晴日が続いて後なされた。すなわち、14mm の降雨があった 17 日以降は、25 日にわずか 4.5mm の雨がたっただけで、ほぼ 13 日間、無降雨状態が続いて後の測定値である。

いま、図 3 の実測値である白丸について、その変化をみることにする。

最初の測定においては、humus 層の含水率は斜面の各部分で 22~29% である。斜面の位置による差は大きい、斜面方向でみても、明確な傾向はあらわれていない。しかし、根圏層および非根圏層については、斜面の位置にかかわらず、ほぼ 16~18% と一定している。これに対して対照点では 21~22% とライシメーター内より高くなっている。第 2 回目では次のようになる。humus 層についてみると、上部・中部では 13~17%, これに対して下部・対照点ではそれぞれ

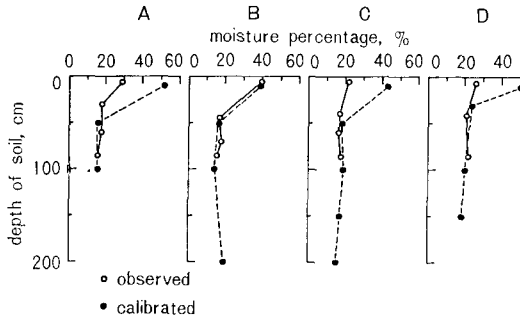


Fig. 3-1. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Jul. 10th, 1975)

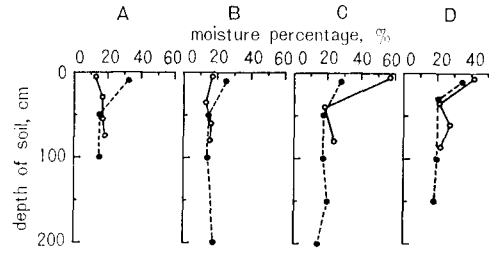


Fig. 3-2. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Jul. 15th, 1975)

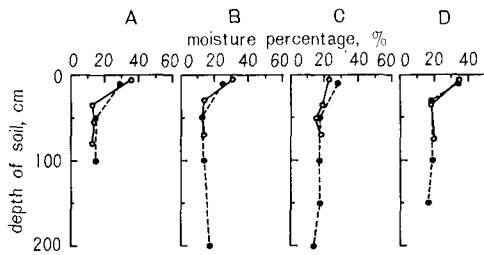


Fig. 3-3. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Jul. 18th, 1975)

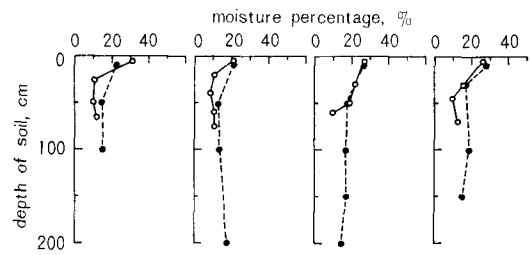


Fig. 3-4. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Jul. 21st, 1975)

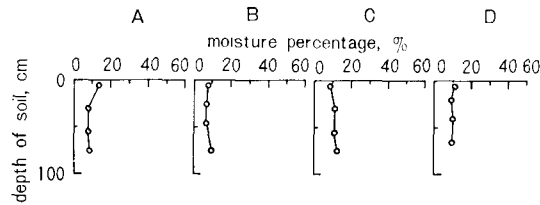


Fig. 3-5. Moisture Percentage of each Point and each Depth (Jul. 30th, 1975)

57,42%と著しく高い。一方、根圏層・非根圏層では1回目とほとんど変化ないか、もしくは、わずかではあるが、鉛直方向での下方移動および斜面方向への移動が認められる。第3回測定では、humus層で上・中・下部・対照区で36, 26, 23, 35%であるが、これは第2回測定に比し、上・中部で増加するが、下・対照区で減少しており、現象的には理解し難い結果である。これは humus 層における含水比測定に際して、試料中に入る有機物の多少がこのような差をもたらすものであろう。しかしながら、根圏層・非根圏層についてみると、上・中部で減少傾向が続き、下部・対照点でも、これが認められる。humus 層を除き、その下方の土壌層での水分減少は第4回測定にも認められ、第5回目に到って各部分の含水率は最も低く、かつ各測定点とも7~13%と接近した値となってきた。ただ、斜面上・中部は7~10%, 下部・対照点では10~13%とまだ、

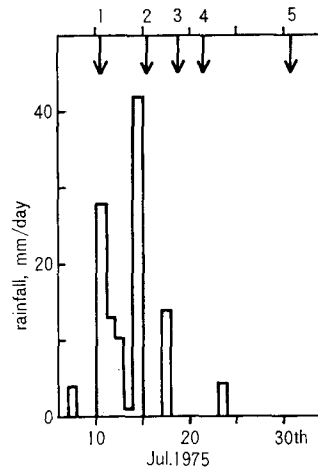


Fig. 4. Hyetograph from Jul. 6th to 30th (arrow marks indicate dates taking soil samples)

わずかながらも差がみられる。しかしながら、この時期には、humus 層の含水率もそれ以下の土壌層のそれに近づいてくる。先に述べたように、第5回測定は、ほぼ13日間の無降雨日の後の値であり、3～4回測定の減少割合と4～5回測定のそれを比較してみても、その割合が小さいことから、移動容易な重力水は消失している時期の値であるとみて間違いはないであろう。

いま、斜面内で、7月10日から7月30日以内に移動した水量を求めてみる。近似的に、humus 層の最高値を40%、最低値を10%とすれば、その差は30%となる。また、根圏層・非根圏層について、斜面上・中部と下部・対照点では、それぞれ最高値で18%と20%となる。これに対し最低値は8%と10%程度であるから、両者とも差すなわち変化量は10%である。地表下1mまでの土壌における水分変化量は130mmとなる。実際には非根圏層は2mより深くまで続くのであるから、変化量も、より増大する。一方、7月6日～30日迄の総降雨量は127.0mmであった。すなわち、この期間において、降雨量とほぼ同量の水分が、1m深までの土壌から失なわれたことになる。

つぎに、水分変化をさらに経時的にみるために自記計による測定値を使うことにする。

2. 自記々録計による土壌水分

i) 1975年7月14～17日の場合

先ほど述べた図3-1～3-4の黒丸は記録値から求めた計算含水率である。humus 層を除き、電気抵抗方式によってほぼ妥当な値が得られるものと考えられる。なお、humus 層については、その実測値のバラツキに試料採取個所の差があらわれていることを考慮するならば、むしろ計算値の方が、真の値に近いかも知れない。なお、150, 200cm 深については実測値はないが、1-i) による結果から、50, 100cm 深の計算式をそのまま使用することにした。結果的には試料実測値と電気抵抗方式における計算値との対応関係が安定している領域内の値となっているのでほぼ妥当な値であると考ええる。

さて、1-ii) で使った期間から14～17日取り出し、その水分経時変化をみることにする。

水分変化をもたらした降雨は総量で42mm、最大時間雨量は15.0mm/hrである。これを図5-1～5-4にあらわす。図5は水分の時間変化を強調するために、降雨開始前含水率を差引いている。その初期の含水率は表2に示す。

図3において、最も単純な変化を示すのは斜面上部である。10cm 深の水分は、降雨終了後、一次関数的というより、むしろ指数関数的減少をしている。この傾向は中部・対照点ともに認められる。また上部では、10cm 深の水分変化に2時間遅れて、50cm 深に水が到達し、さらに4時間遅れて、100cm 深に達している。しかし、含水率の変化としては0.2～0.4%程度であり、この変化が2mまで起っているとしても、水分増加量はただか8mm程度である。むしろ、この降雨に際して、土壌水の変化は、土壌下50cm 以内で起っていると考えられる。

一方、斜面中・下部および対照点では顕著な2つの傾向がみられる。まず、中部-100cm 深と対照区-30cm 深を代表とする、降雨初期の含水率の相当量の低下と、降雨終了後1日経過してからの水分急増およびその後の急減である。現時点でこれらの結果を合理的に説明することは難しい。後に見るように他の降雨の際には上記のような傾向は認められないので、むしろ何らかの原因で水分測定に異常があったかも知れない。

Table 2. Initial Values of Moisture Percentage (%) at 4, Jul. 14th

Depth (cm)	A	B	C	D
10	35.4	24.9	30.1	36.1
30	—	—	—	25.2
50	15.1	16.0	17.8	—
100	15.6	16.2	17.7	19.7
150	—	—	19.3	17.2
200	—	18.1	14.7	—

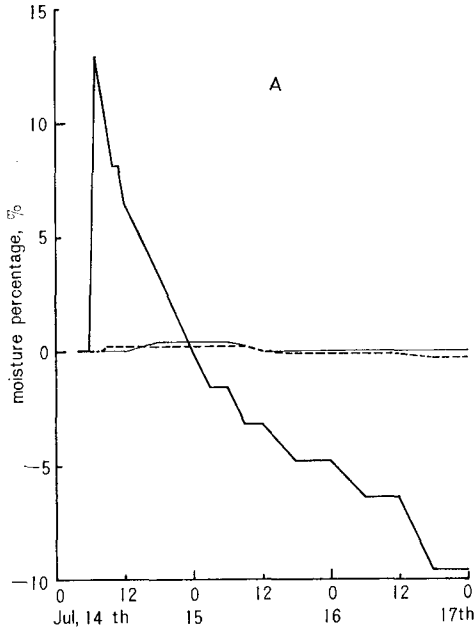


Fig. 5-1. Change of Moisture Percentage

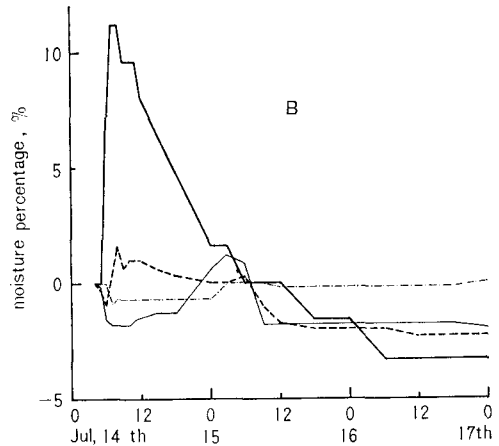


Fig. 5-2. Change of Moisture Percentage

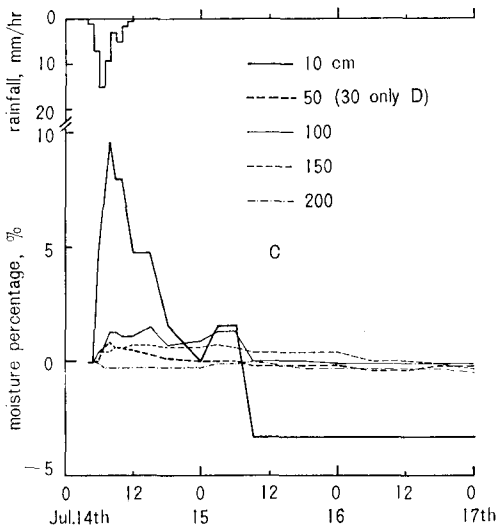


Fig. 5-3. Change of Moisture Percentage

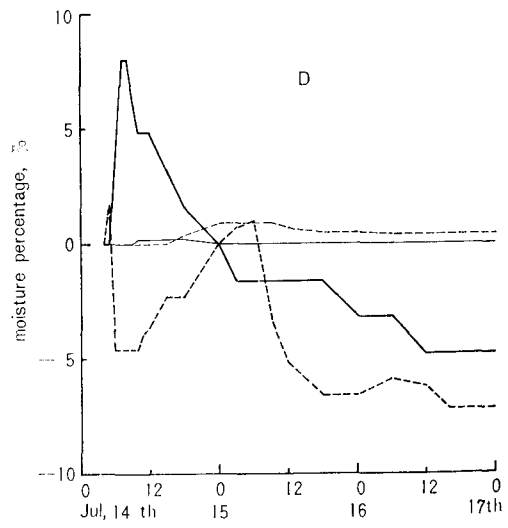


Fig. 5-4. Change of Moisture Percentage

つぎに総降雨量の多い事例として、1974年の場合を、また時間雨量の大きい例として1973年の場合について、その水分変化をみることにする。

ii) 1974年8月25日～31日の場合

自記計の記録時間々隔は3時間であり、計6日間の経時変化をみる。この期間の降雨は3回に分けることができる。1回は8月25～26日にかけて計131.5mmであり、2回目は8月27～28日にかけて27.0mm、3回目は8月29日に2.5mmである。最大時間雨量は、第1回降雨の降り始めに36.5mm/hrである。

これらの変化を図6-1～6-4に示す。

まず、斜面上部についてみる。上-10cm 深では、含水率は数時間の時間遅れをもちつつも、降雨量の変化に追いついている。これに対して、この期間での変化量、2.4%、0.8%である上-50、上-100cm ではどの変化も非常に緩慢である。これも 2-i) で見たと同じ傾向である。さらに、降雨の始まりと水分増加の始まりの時間遅れも、上-10 で 0 時間であるのに対し、上-50 で 6 時間、上-100 で 21 時間となる。

つぎに中部についてみることにする。中-10cm 深は上-10cm とほぼ似た変化をするが、その

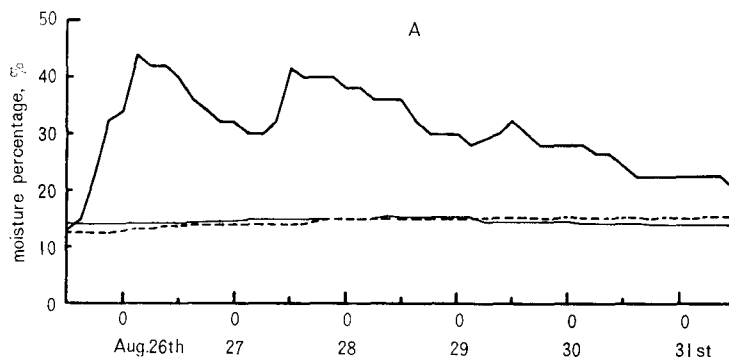


Fig. 6-1. Change of Moisture Percentage

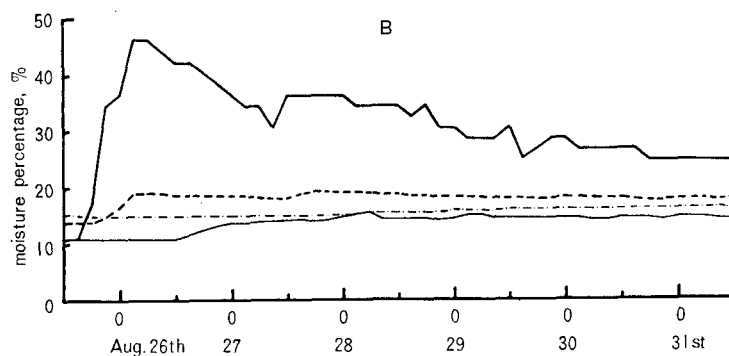


Fig. 6-2. Change of Moisture Percentage

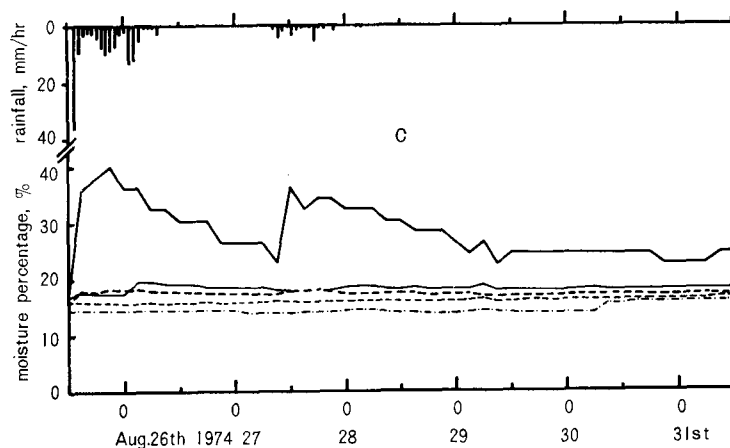


Fig. 6-3. Change of Moisture Percentage

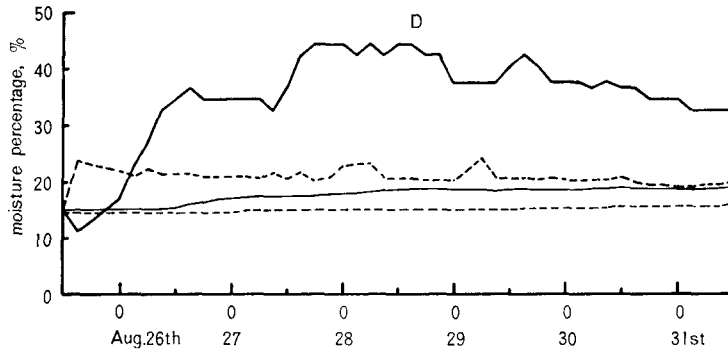


Fig. 6-4. Change of Moisture Percentage

減少は上部より遅い。中-50, 100, 200cm 深における変化幅は、それぞれ、5.6, 4.8, 1.1%と上部よりも増加している。

また遅れ時間は中-10, 50, 100, 200cm 深で、それぞれ、3, 6, 24, 57時間である。

つぎに斜面下部についてみる。まず C-10cm 深では中・上部に比べて1回目の降雨に対する水分増加最大値が6時間早くあらわれる。

また、下-50, 100, 150, 200cm 深の含水率の変化量は、それぞれ2.4, 2.0, 0.8, 2.0%となる。これは上・中部に比べて下層の変化が顕著になっていることを意味する。さらに水分上昇時刻は10~100cm 深にかけては、ほぼ同時刻に発生している。

一方、対照点における水分変化は複雑である。D-10cm 深では降雨変化との対応がはっきりしないし、これについては、むしろ D-30cm 深の方がまだしも対応している。これらの変化についても説明が難かしい。D-100, D-150cm 深では含水率の変化量はそれぞれ、3.9, 1.1%と大きい。

全体的にみれば、降雨量の時間変化に対応して水分変化をしているのは、humus 層と根圏層の上方部分までとなる。それより下層の土壤層においては、水分の時間的变化は、緩慢になる。さらに、斜面方向で下部に向うにともなう、各土壤層とも水分変化は大きく、かつ鋭敏になってきている。

iii) 1973年8月28日~29日の場合

この記録も3時間々隔の測定値である。時間雨量は38.5mm/hrであり、総雨量は4時間で

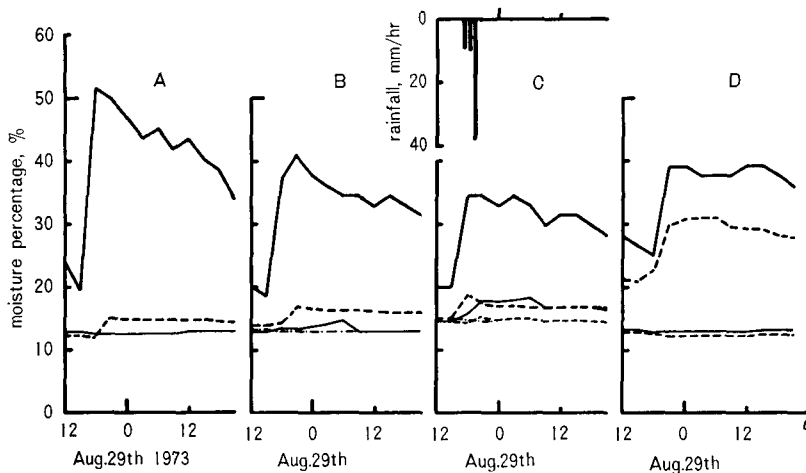


Fig. 7. Change of Moisture Percentage

58.5mm である。

斜面上部においては、50 cm 深の水分計も鋭敏な変化を示す。さらに中部・下部についても100 cm 深までは i) ii) に比較して変化幅が上がっている。一方、humus 層では、上部から下部に向って含水率の減少割合は減少している。これは、すでに述べたように、斜面方向の水分移動を意味する。

第3章 総 括

以上、2 度の実測水分と3 度の降雨前後の水分変化をみてきた。その結果、No. 4 ライシメーターにおける土壤中の水分変化について、次のことが言えるであろう。

1. 無降雨日が続けば、土壤水分の容積含水率は、土壤層の相違すなわち、間隙率の変化にもかかわらず、鉛直方向で、ほぼ同程度の値になる傾向が、1-i) および ii) における図3-5 から認められる。
2. 重力水として移動すると考えられる最低の含水率は、図3-5 から、ほぼ8～10%であった。
3. No. 4 ライシメーターにおいて、地表下 2m までの土壤中に、重力水として含まれ得る最大可能水量は 892mm となる。
4. しかし、測定例からは、根圏層の飽和度は最大でも50～60%程度であり、実可能水量は3項で述べた値より大きく下回る。
5. humus 層内水分の降雨終了後の減少過程は直線型よりも、指数関数型に近い。さらに、斜面の下方に向うに従って、その減少割合が低下するのは、斜面傾斜と同方向の水分移動が存在することを意味する。
6. 特に直接流出に関係する水分変化は、せいぜい地表下 50cm 程度まで、すなわち根圏層までである。この原因としては、それより下方の土壤層の透水性が悪いからと考えるよりも、それより上方の土壤で貯留し得る水量が多く、かつ飽和する以前に、斜面方向への流下が始まるためと考えられる。

お わ り に

筆者は先の報告¹⁾で humus 層の流出成分は No. 4 ライシメーターでは、せいぜい2,3% 以内であることを述べた。一方、本報告では、土壤水の変化は humus 層で顕著で、直接流出に関係する水分変化は、せいぜい地表下 50cm 程度までの根圏層であることを報告した。この間を埋める作業が今後に残される。

なお、本研究に際して多くの人の助力を得ている。とりわけ、常に観測をともにしていただいた加藤博之君、鈴木雅一君、谷 誠君には謝意を表する。また武居有恒氏、小橋澄治氏については有益な助言をいただいている。記して謝意を表する。

引 用 文 献

- 1) 加藤博之・福嶋義宏・鈴木雅一：山腹斜面の流出機構について(1)ーライシメーターと表層流出量についてー：京大演報，47，74-85，(1975)
- 2) 福嶋義宏・加藤博之・松本 潔・西村武二：花崗岩山地の2つの小流域について（地形・植生・水収支・流出減衰曲線からみた特性）：京大演報，43，193-226，(1972)

Résumé

The movement of soil water must be analyzed in order to understand runoff phenomena on a slope. For this purpose, the author observed the variation of soil moisture directly by the measurement of extracted soil samples and indirectly by a method of electric resistance. The experimental site is situated at No. 4 Lysimeter of Kiryu Experimental Catchment, which is 5 meters in width, 10 meters in length and 16° in gradient. The catchment is located in Otsu city, Shiga Prefecture and consists of granite. The results are as follows:

1. On consecutive clear days, it was recognized that the moisture percentage took an almost definite value on a vertical direction, in spite of the difference of soil porosity.

2. The minimum moisture percentage of gravitational water were considered to be about 8–10%.

3. In this Lysimeter, the maximum potential storage of gravitational water which was included in the soil layer up to 2 meters in depth, was 892 mm. However the actual maximum water content in the layer of intensive root zone was only half of saturation capacity.

4. The recession curves of soil water in humus layer were expressed more appropriately as an exponential function than as a linear function. In addition, the recession rates decreased going down the slope. And it was assumed that the soil water in the humus layer was moving laterally along the slope.

5. The movement of soil water that was involved in the direct runoff was limited within 0.5 meters in depth at the most, namely, within the intensive root layer. The reason was guessed that the lower part of soil layer did not have lower percolation capacity, while the upper part was able to store more water. And the runoff along the slope started before the soil saturated.