

1. 水資源の賦存状況の調査にあたり、表流水のもつ重要性には誰しも異論はない。その発生に関しては従来ハイドログラフの解析やモデル論、小流域での実測などを主とする研究が主であったが、筆者は降雨実験装置を用いて、盛土の実験流域において表流水を発生させることにより、その発生と変化の状態とを明らかにすることを目的として、以下のような実験を行なった。

2. これまでは実流域においてこの種の研究が数多くなされて来た。また試験流域も有効であった。しかしこれらの場合は適切な降雨に恵まれないため明確な結論を出すのは大へん困難である。現実には降る雨は時間的・空間的に著しく変動するもので、通常の地上雨量計は積分記録器であるため、人の目が誤魔化されているし、解析しやすい任意の波形の雨を降らせることはできない。それで、人為的な装置等により都合よい雨を降らせることができれば大へん便利である。このような装置を用いると流域面積が狭くなってしまい、実流域のシミュレーションというわけには行かなくなる。しかし、斜面(土)と降雨(水)との相互作用としての表流水の発生の一断面であることだけは確かであるので、ここでわかった2、3の事実を列挙して、表流水のうちの表面流出と中間流出の性格について述べる。

3. 装置は、防災センター大型実験研究部にある装置を用いた。これは地上より16mの高さにあるノズルから所定の強度の雨が降るようになっている。この下には有機質の畑土の盛土をして実験斜面を作った。この斜面の面積は102m²で中くぼみで最大傾斜13°である。この斜面は2年間放置され、一年生の草本の根、霜柱などで、表面の空隙率は80%に達している。

降雨はある時間内一定という単純な長方形波を与えた。場合によって異なるがほぼ60分の継続時間である。

データとしてはこの他に住宅公団・土木研究所が別個に多摩ニュータウン内で行なった散水実験の結果も併記してある。これは多摩ニュータウン内の一区画に貯水池又は消火栓からの水を散いて、流出の発生を測定したもので、流域面積は60~1200m²の自然斜面、造成斜面などである。

4. 流出波形は幾段かの流出成分に分かれていて、第一の成分が立上り、定常状態に落ちつくと、第二の成分が立上り、次の定常状態に近づくようになる。強度が100mm/時になると、第三の成分が加わって流出波形は極めて複雑となる。

目視によれば、降雨開始とともに流域は濡れるが下端集水路付近凹部に水溜りのような薄い水の層ができる。集水路に水が落ちてくるのは水の薄い層のある部分だけである。この部分は雨量強度が弱いときには広がらないが、強いときには一気に全流域に広がる。水は地表を流れていることが確認されるが、草の株などのため、薄層流のような流れ方ではなく、地表の凹凸によって、石段を流れ下って行くような感じである。

このような状態では表層5cm位の土は水で飽和しているが、それ以深は目視でも明らかな不飽和状態である。テスト孔を開けると、見る見るうちに水が浸み出して来て、数秒で土は水で飽和する。つまり不飽和帯の中に空気が閉じこめられているままで鉛直浸透が行なわれていて、表面流出が発生している。

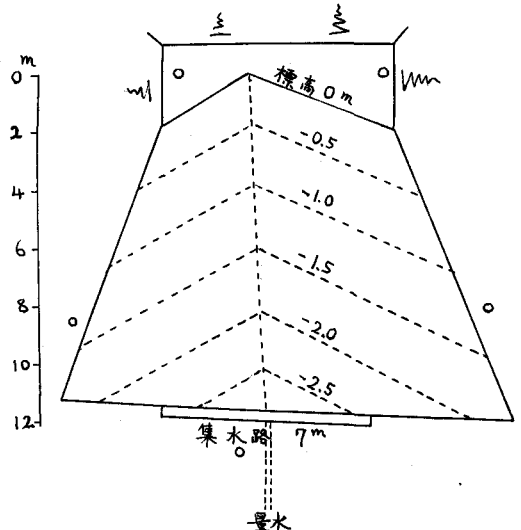


図1 実験流域説明図
○印は雨量計位置

表層の飽和帯をテスト孔で破ると空気が逃げるといわけである。雨量強度が強い場合は表層の飽和帯が厚くなることが考えられるが、あまり量的なことはわからない。

雨量強度 50mm/時以上が続くと、下流端集中路付近から水が湧き出してくる。これは盛土下部に発生した地下水が湧き出すもので、一種の地下水流出と考えてもよいが、盛土全体に発生している地下水というよりは流域の形状により、あるいは水道を伝って局部的に現れたものと解される面もあって、中間流出ともみられる。

5. 総流出量 f_v 、ピーク流出率 f_p は図2のようになる。この場合総雨量 r_v 、総流出高 g_v 、雨量強度（一定） r_p 、ピーク流出高 g_p とすると

$$f_v = g_v / r_v, \quad f_p = g_p / r_p$$

と定義する。長方形の降雨を与えているので継続時間を t とすれば $r_v = r_p \cdot t$ である。ピーク流出高 g_p は雨を止めた時の流出高をとる。 t は表面流出の集中時間と比べては十分長い。 t は 60 分で統一した。60 分以上の例では 60 分の流出高を用いそれから減水したと仮定して補正している。 t によって結果が変わってくるからである。

第一にこの図から言えることは流出率は 100mm/時前後で急増するということである。これまで莫然と流出率は雨量強度の関数とみられていたが、ある特定流域とは言え、このように変化の傾向が明らかになったことは有意義である。特にこのあたりの雨量強度は災害の発生と関連深い範囲であるだけに重要である。

第二に $f_v < f_p$ であることに注目したい。雑に言うと、一定率で浸透する流域からの流出は $f_v = f_p$ で、この値が一定率となる。しかし f_v が小さいということは初めの流出は小さく後ほど流出が大きいこと、これと表裏の関係にはあるが、何か時定数の長い流出成分がはいっていることを示唆している。

6. 図2中のAは次のような場合のデータである。はじめ 21.5mm/時の雨が 59 分続き、その後 91mm/時の雨が 30 分降った場合の、後の

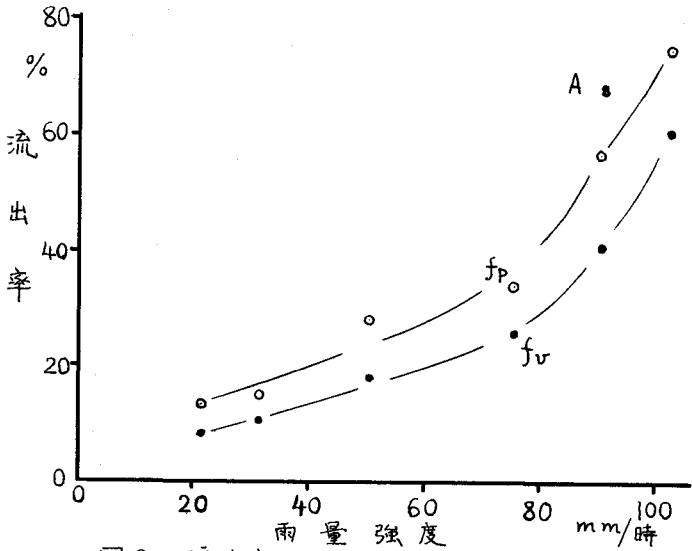


図2 流出率 f_p, f_v と雨量強度 (60分)

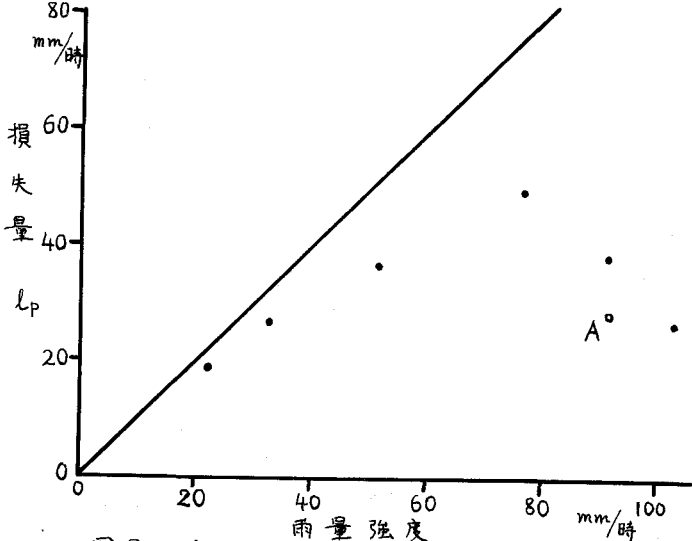


図3 ピーク時の損失量 l_p

強い雨についての f_v と f_p であって、共に 0.69 程度の値となっている。これだけが継続時間が 30 分であるが、この例が示す意味は

- (ア) 前の雨によって、流出率というものはこの程度に増加する可能性があること、
- (イ) 前の雨約 20 mm によってほぼ定率的な損失機構になっているのではないかとと思われること、
- (ウ) ハイドログラフを見ても立上りが早いこと、

などがあげられる。

7. ピークにおける損失 ℓ_p の値は図 3 に示す。ピークはほぼ定常状態に達しているので、ある意味で最終浸透能のようなものを表わしている。横軸が雨量強度であるので、 45° の線に左側では漸近するのは当然だが、右側へ向っても落ちている。これが f_p の急上昇する原因の一つで、恐らく、不飽和土壌中の空気が地表の雨水の圧力によって閉じこめられるためにこのようになったと考えられる。森林土壌ならばこのようなことはないと思われるが、この実験流域は 2 年間放置したとは言えブルドーザで整地したので、このような性質を示すのであろう。

8. 住宅公団・土木研究所が行なった野外散水実験のデータも加えてプロットしたものが図 4 である。ここでは降雨継続時間 60 分以上のものについては 60 分で打切ったと仮定して減水曲線を使って総流出量 g_v を求め、60 分以下のものについてはピーク流出が続いたと仮定して降雨継続時間を 60 分の場合に補正している。

図中 7B とはひな段造成された粘土質の土地で、 f_v が 1 をこえるという大きな値を示している。全く不浸透の流域とみて不定流計算で計算すると立上り部、減水部などはよく合う。貝取 B は自然の灌木林の 11° の斜面で、地表から数 cm は落葉層、30 cm くらいまで黒色の腐植土であった。このような場合は流出は 1 時間以上経ってから現われ、3~4 時間でも定常状態に達せず、見かけ上 $f_p = 0.4$ 程度にとどまった。図ではほとんどゼロとしてプロットされている。

貝取 A は粗造成された 4° の斜面で関東ローム・粘土・砂・礫などの混った土であった。流出は散水開始後数分ではじまり、かなり大きな流出率を示す。瓜生も粗造成された宅地で、この両者を併せて傾向をみた方がよさそうである。これに対し落合は芝生であって点はばらつくが一つの傾向をもつ。このように粘土質の造成地 7B では総流出率 1、粗造成地・貝取 A・瓜生では 0.5~0.6、芝生の落合では 0.4~0.5、畑土の人工盛土についてはすでに述べたようになり、自然斜面では 0 に近い。これらの値を乱暴ではあるが傾向線で結んだものが図 4 に記入してある。勿論継続時間を増せば f_v はもっと増すであろう。

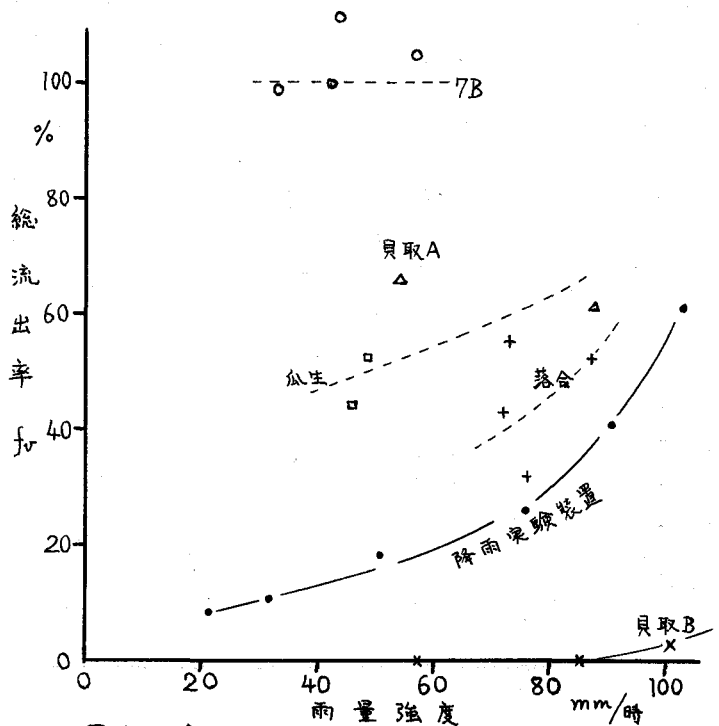


図 4 各地の散水実験比較

9. ハイドログラフは極めて複雑である。

降雨実験装置の畑土盛土について、 31.7mm/時 の雨を2時間降らせると、流出はほぼ直線的に増して100分程度で定常に達する。 51mm/時 では20分ほどで定常に達するがその5分ほど後に第2の立ち上がりが始まる。 75.5mm/時 の場合は最も顕著で例として図5に示す。 $90\sim100\text{mm/時}$ の場合はこのような2段構造ではなくもっと複雑である。 75.5mm/時 以下の場合が損失 ℓ_p の関係がきれいであるところを見ると、 $50\sim70\text{mm/時}$ 程度が表面流出の分離として最もわかりやすい範囲ではないかと思われる。

第一の流出は狭い意味での表面流出と言える。下流端集水路付近に発生する。実流域でも恐らく斜面末端で発生すると思われる。 $20\sim30\text{mm/時}$ 程度では表面流出の発生する地域は広がらず、極端に言えば、ほとんどの雨水が浸透する。恐らく鉛直に不飽和層を降下して行くであろう。 $50\sim70\text{mm/時}$ になると表面の飽和層へはいった水は一部は不飽和層へはいるが、残りは飽和層内を流れ下る。これは色素で追跡した結果定性的に求められた結論である。この水が集って下流端集水路付近で厚い飽和層を作りそこからの流出がはじまるのが第二の流出であろう。

このような2段のハイドログラフは他の散水実験にもみられる。第一の表面流出、それが定常に達してから中間流出のような成分が現われる。長方形波形の雨を与えるから、このような現象が明らかになるのである。

100mm/時 前後になると、流出波形の立上りは極めて早い。そして波を打つ。不飽和層の空気の挙動によるものだろうという推定については前に述べた。

10. 流出率をもっと大きくなる可能性はないか。本実験では降雨継続時間を60分と統一した。もしもっと長い雨であつたら、勿論流出率は増すであろう。初期の雨量強度が弱くても、その後の強い雨量強度で大きい流出率になることは6. で述べた。

実流域でどんな流出率になるかについてはこれまでに多くの報告があるが、筆者の知る例では昭和50年8月17日台風5号による仁淀川の川口～伊野間の支川 51.8km^2 について、総流出率で1.14、吉野川早明浦ダム流域 46.2km^2 で0.95がある。観測精度の問題もあるが総雨量がそれぞれ 697.4mm 、 621.3mm でこのような大きい流出率となっている。

11. 降雨実験装置内において盛土の流域を作り、長方形の降雨を与えて流出成分の意味を調べた。

実流域では斜面上が 100m 以上あるがこの流域は 10m しかない。実流域では厚く腐植土・落葉で覆われているが、この流域では自然状態を2年しか経過してないからこの結果で流出率がいくつであると結論づけるつもりはない。しかし、表面流出は発生しにくいこと、中間流出的な流出は雨量強度とともに急激に大きくなることなどが明らかになった。今後これらの成分の意味と、流出率との関係を明らかにしていきたい。

参考文献：国立防災科学技術センター：1975年8月17日台風5号による高知県中部の災害現地調査報告

