

河川部門一自由課題

第19回建設省技術研究発表会

流出の逓減曲線に関する実験の一考察

108

昭和40年11月

建設省土木研究所
水文研究室

流出の逓減曲線に関する実験の一考察

水文研究室 青木 佑久

1. 序 論

この報告は土木研究所水文研究室が、本年春より赤羽分室内の荒川堤防斜面を利用して始めた、斜面浸透流出に関する基本実験と、以前から天竜川支流三峯川の美和ダム流域（長野県南部）に設けてある美和小試験地とから得られた流出に関する資料から、とくに降雨後の逓減に関して考察しうることを述べてみたものである。

低水流出について言えば、流出の大部分はいうまでもなく、降雨のうち直接流出とならずにいわゆる初期損失となつて地中に浸透し、地下水の増加となつて貯溜され、その貯溜地下水が長期にわたつて徐々に低水となつて流出しているものであるから、われわれはこの浸透雨水が地中において如何ような運動に従つて流下するかに着目し、実験および資料整理の主眼とすることにした。

美和ダム流域は、降雨量は多くなく、乾燥している地方だから地面蒸発量は比較的大きく、降雨時にもほとんど直接流出は見られない。従つて浸透流出について赤羽の浸透実験と結びつけて考えるには適当な試験地と考えられる。

2. 斜面浸透流出実験およびその成果

(1) 実験設備および実験経過

われわれが土研赤羽構内に設けた浸透実験斜面というのは、いわゆる箱型のライシメーターであつて、縦3 m、横1 m、詰められた土または砂の厚さが約4.5 cm、斜面傾斜角は縦方向に2.0°とした。浸透流出水は、斜面下端中央に連結された管を通じて、転倒升（1転倒15.7 cc）によつて流出量を測定できる。これと同一規模のものを8基設け、うち1基には粒径の細かい砂（ $d_{10}=0.14\text{ mm}$ ）を、もう1基には粒径の粗い砂（ $d_{10}=0.35\text{ mm}$ ）を、残りの6基には関東ローム（ $d_{10}=0.008\text{ mm}$ ）を詰めた。たゞし予算の都合上、浸透流出量測定装置を備えたのは、細砂、粗砂および関東ロームが3基の計5基で、関東ローム3基のうち、1基はビニール片を載せて蒸発を抑制し、1基は草を繁茂させて蒸散を促し、残りの1基は何も施さず裸地とした。砂の粒径の変化あるいは土壌面の被覆状態の変化によつて流出状況の変化を観察できることに関心を持った。

これらによつて、得られた流出の資料を整理するに当つて、われわれが最も苦労しまた関心を持ったのは、地面蒸発量と含水量の精度良い測定が出来るかどうかということであつた。両者の測定については、古くからいくつか浸漏計（ライシメーター）が考案され、当水文研究室においても、二三試作されたがついに有効な資料を得る陽の目を見ず、失敗に終つた。気象庁型の蒸発計（口径200 mm）を用いて水面蒸発の

測定はしたが、地面蒸発を促す要因は、空氣の湿度、風等の氣象条件のほか、地中の水分の分布状態、毛管現象が起るような土あるいは砂の間隙等の条件も加味されて来るので、両者には必ずしも相関関係が存在するとは言い難く、地面蒸発量の算出には、やむをえず相当長期間の総降雨量と総流出量との差を日数で除した値を以て當てた。また含水量の測定については、近來農業部門において畑地土壤管理の面から、間隙水圧の伝達を利用して土壤水分量を測定する器具が考案されているが、これについてはわれわれは目下試験段階で、定量的な測定は間に合わず、従来通り、何箇所かの適当な部分の砂または土を採取し乾燥して求める方法を取つた。

実験斜面に注がれる雨水については、本年は自然降雨が多かつたのではほとんどこれによつたが、比較的長期に無降雨時が続く場合には、人工的に注水を試みた。浸透流出を考えるには、雨量強度の変化がない人工降雨の方が考え易いからである。

(c) データおよびその整理

得られた各浸透流出量の累加値からそれぞれ単位時間当りの流出量が計算され、各平面積 (3 m^2) で除して、 mm/h の単位で表わせば降雨量と比較出来る。

ある適当な量の降雨があつた場合を観てみよう。5基の観測斜面に同一量、同一程度の降水であつたと仮定する。誰でも予測出来るように各斜面の浸透流出状態は、それぞれ異なり、砂については、粗砂の方が細砂よりも早く多く流出し早く減衰し、土については、被覆して蒸発を抑制したもの、何も施さないもの、草を繁茂させて蒸散を促したものの順に浸透流出量が多く長く続く傾向が見られる。しかもこの流出状況も、降雨前に降雨があつた場合と、長く無降雨が続いた場合とでは、流出量および流出時間遅れも当然異なる事から観て、浸透流出に関係する主な要因としては、Darcyの透水係数および毛管現象(土砂と水との分子間引力)を支配する砂または土の間隙(空隙)のほか、当該時刻に砂または土の層に含まれている保湿度(すなわち含水量)が、大きなファクターになつてゐるはずである。上に述べた土の3種についても、土の物理的性質が同じであると考えられるのに、浸透流出状態に差異が生ずるのも、地表面からの水分の蒸発散の差異によつて、当該時刻の保湿度に差異があるからであると考えられる。

任意の時刻における、砂または土の層中に含まれる保湿度の推算は、精確な間隙水分量あるいは地面蒸発の測定が困難な故に難しいが、いまそれぞれ大まかな平均値を用いて、各時刻ごとに砂または土の保湿度を求め、さらにこの値と同時刻の浸透流出量の値とをそれぞれ両軸に取つた関係図を書いて見れば、各浸透斜面について、両者の間には一義的な関係が存在していることが分かる。この考え方はちよつと、河道の流出量が、流域内の貯留量と一義的な関係が存在するとし、その関係式を定めて流出量を知らうとする木村氏等の貯留関数法の考え方になぞらえることが出来る。いまこれにない、各時刻の砂または土の層中の保湿度を B 、また浸透流出量を Q とし、

両者を対数尺の目盛に画いてみると、各斜面についてはほぼ直線状になる。したがって、 S と Q との関係は概略

$$Q = k S^P$$

となる。さらにこれを連続の式、 $Q = -\frac{dS}{dt}$ と合わせて、 $Q = (A t + B)^{-C}$ (A 、 B 、 C は P によつて定まる定数)の形で表わすことが出来るだろう。 P は一般には $P > 1$ であつて、粒径、空隙率等の砂または土の物理的性質の影響を受けて変化する。 P の増減はほぼ粒径の増減に伴うようであるが、さらに土の場合、その含有物によつては流下する水と化学的作用を起こし、水道を妨げ透水能が変化し、その分だけ地面蒸発することもありうるわけで、一概には断定し難い。

数式的には、砂または土の層中に湿分が含まれている限り、浸透流出は起りうるわけであるが、実際には、ある保湿度以下になると浸透流出しなくなる。われわれの実験では、流出の起る最小保湿度は細砂の場合65mm程度であつた。粒径が粗いとこの数値より小さく、土ではこれより大きいだろう。粒径のほか層の厚さにもよるだろう。降雨があつてもこの保湿度に達するまでは保湿度不足量を補つて吸収され、浸透流出は起らない。

データの詳細な解析については、目下検討中であるので、後に譲るが、砂(細砂および粗砂)について得られた、時間-浸透流出量曲線の一部を図に掲げおく(図の1)

3. 美和小試験地における観測とその成果

(1) 設備

前にも述べたように、天竜川上流の左支川三峯川の美和ダムの右岸流域で、長野県伊那市の東南東15kmの点に当たる、面積136km²の山地斜面で、地質は崩壊性の腐蝕土、試験域内は森林が多く田畑が少しある。比較的乾燥地域であるから、地面蒸発が多く、降雨の際にも、雨水が表面流出となつて流下することはほとんどなく、すべて地中に浸透し、浸透水が地下水を涵養し、それが非常に長期にわたつて徐々に流出すると思われる地域である。

本試験地は、昭和37年、流出に関する水文学一般の観測、とくに浸透、蒸発、流出の関係の観測を主な目的として、中部地建美和ダム管理所の大きな協力を得て設置されたものであるが、観測機械等の不備も手伝つて、長い間納得できる資料が得られなかつた。一昨年、流量観測の為の三角堰を設けたことにより、精度の良い流出量が測定できるようになり、降雨量の記録と対比して、水収支計算によつて、大まかながら、平均蒸発散量は推算出来るようになった。その数値は前にも記したように、本年夏の平均で約2.5mm/dayほど(流出率は60%強)であつたが、例年に比して、無降雨時間が少なかつたし、また地表面付近が乾燥しているときには、蒸発散量が減少することをも考え合わせれば、小さくない数値である。流量は傾角90°の三角堰の水位から換算することにした。堰の背後の貯水池は約7m四方水深は1m内外を変

動する。水位の変動は水研 62 型自記水位計によつて記録された。水位測定誤差はすべての誤差を含めて 0.5 cm 以内に抑えることが出来る。水位から流量への換算は沼川の三角堰公式すなわち $Q = (1.334 + \frac{0.0205}{\sqrt{H}}) H^{\frac{5}{2}}$ (m-sec 単位) によつて計算したが、流量検定によれば、この式は、流量の大きな点では比較的良好だが、水位が 10~20 cm (流量が 0.01~0.03 m³/sec) 付近では計算値の方が実流量より小さくなるようである。

池内に堆積した砂を排除するため水位計のフロートを移動したときを除いて、本年 4 月以来無欠測で、雨量水位観測を続けることが出来た。観測に直接御協力戴いている美和ダム管理所の方々に厚く感謝する次第である。

(c) データおよびその整理

直接流出がほとんどないから、降雨後の最大流出量も小さく、たとえば台風 24 号の場合で、比流量で 0.45 m³/sec・km² (0.6 m³/sec) 程度である。一方、小流域ながら、長期間無降雨状態が続いても、流出が枯れるということはなく、流量の小さな日変化を繰返しつゝ徐々に減少してゆくのが観察される。地表付近は非常に浸透性の強い土壌に覆われていながら、地下にはかなり豊富な地下水帯が存在しているであろう。時間経過と、浸透流出量 (面積で除して mm/h 単位) との関係は、後者を対数縦軸にとつて図に画いてみると、降雨直後は曲線 (下に凸の) 状態であるが、ふつうの降雨で 4~5 日経過以後は、ほぼ直線状の減衰をなす。(湿潤地帯で蒸発の少ない地方、あるいは浸透性の弱い土壌の地点ではこの減衰状態になるのに、より多くの時間を要するであろう。) 4~5 日というのは、2 に述べた赤羽の浸透流出実験で、降雨から浸透流出が途絶えるまでの時間とを考えた場合、おそらくは美和流域においてもこれが地表に達した降雨が地下水面に到達し終るまでに要する時間であり、その後は、地下水が上層から水分を補給されることなく低水流出の水源となつて流出するのである。

傾斜した地下水帯からの浸透流出が、理論的に指数減衰となるか否かは必ずしも明確ではないが、巨視的に言えば指数減衰として当てはめて差支はないようである。(図-2)

4. 両者に見られる減衰状態の検討

実流域における流出とくに低水流出には、地下水帯の水の動きが最も支配的であると考えられるから、その地中での流下運動に着目して考えるのが適当と思う。

すなわち水の流動に関して地中が大まかに、地表から地下水面までを雨水浸透層、地下水の存在する部分を地下水帯の 2 つから成ると考えると、前者については、地表に達した雨水が、その土壌保湿不足分を補いながら毛管現象に逆らつて不飽和状態で流下する層であり、後者は、飽和状態の地下水が土壌間隙をポテンシャル運動して流出する層であると考えられる。

浸透に関しては、言うまでもなく、土壌保湿不足、毛管現象等、非線型運動であるの

圖-1 斜面浸透流出曲線 (S 40. 9. 10~9. 16)

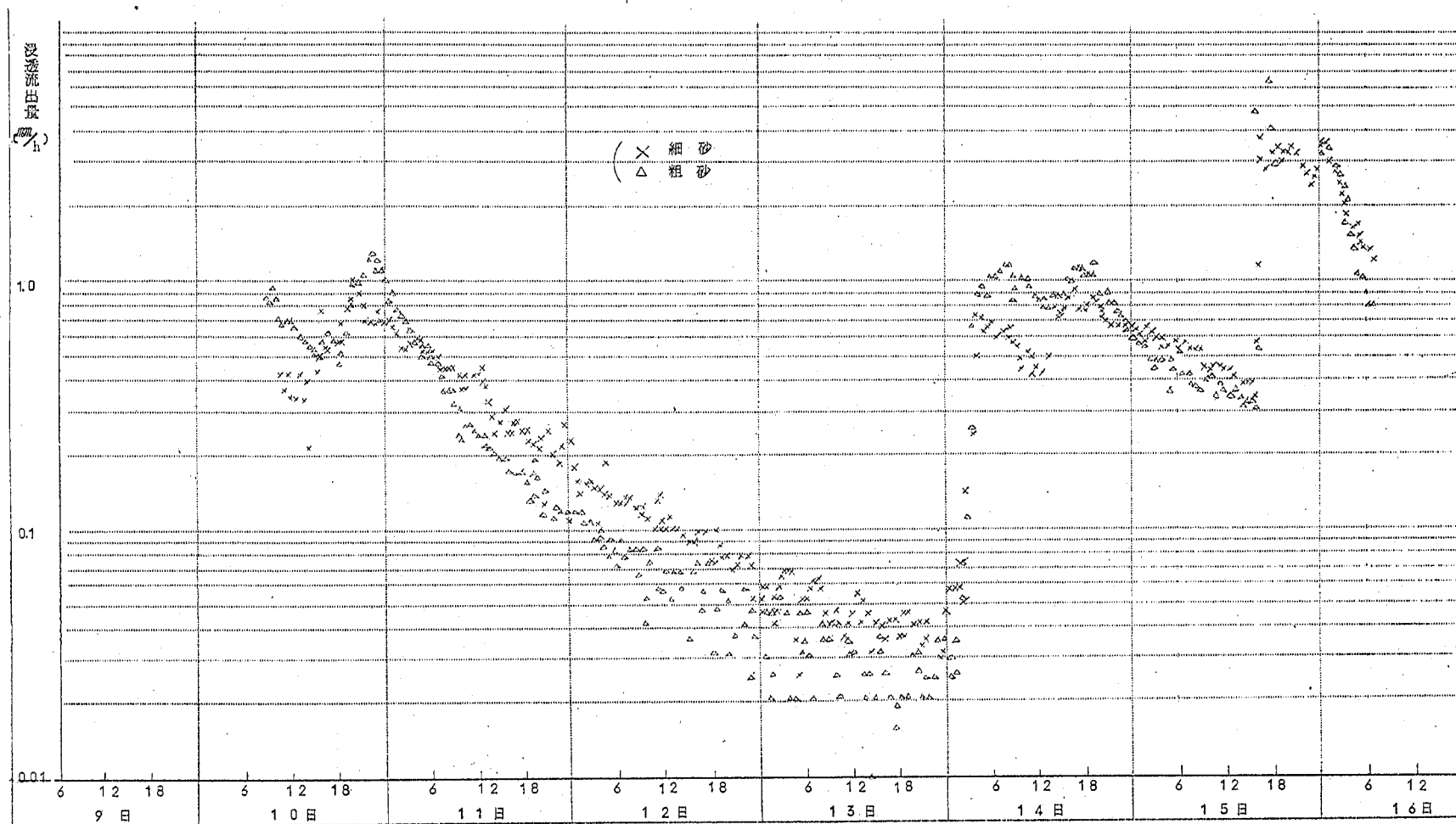
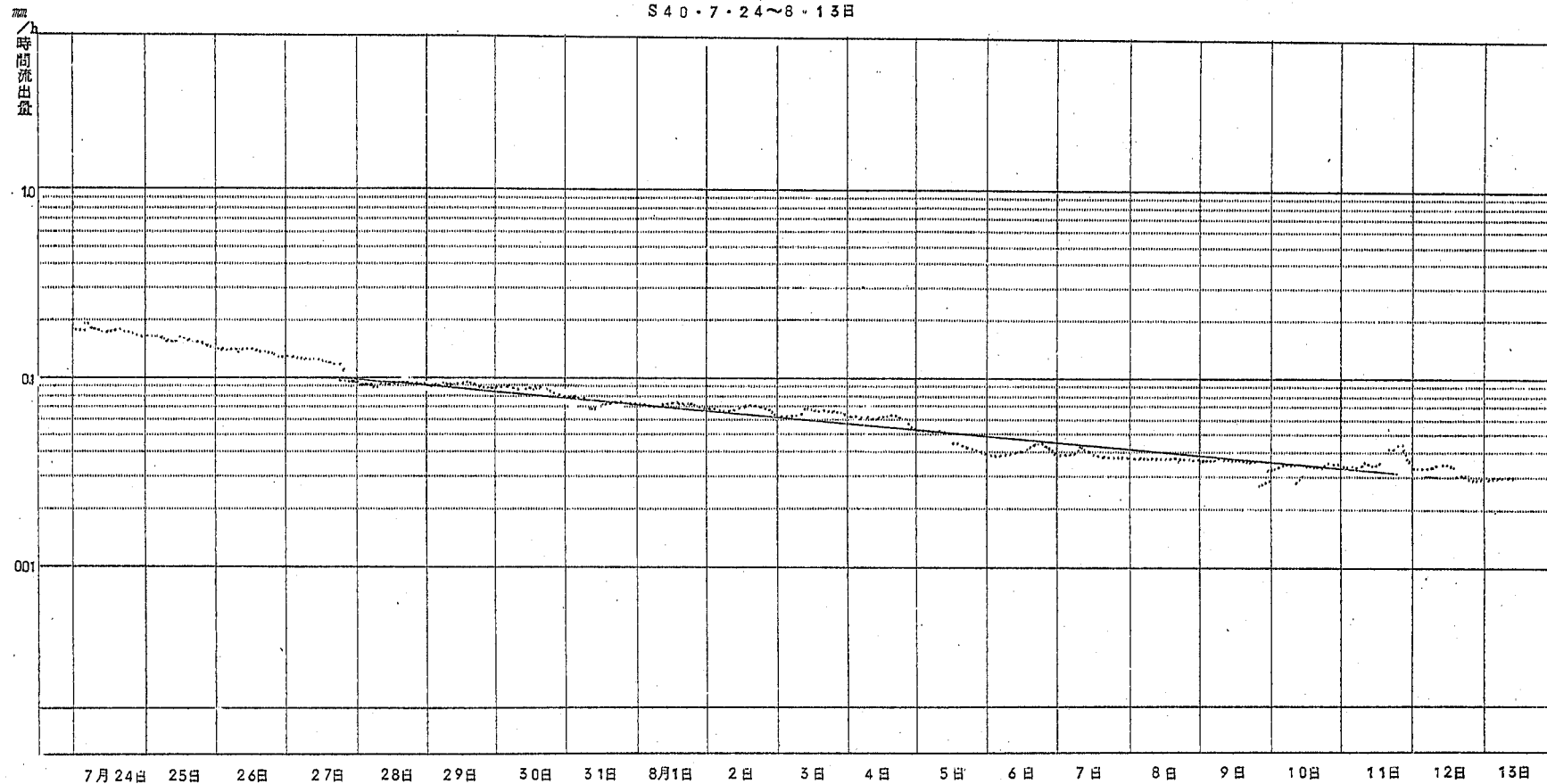


図 - 2 美和流域流出図

S40・7・24~8・13日



で理論的検討は困難であるが、浸透斜面等の実験から、明らかにされる点も多いだろう。地下水帯の流動に関しては、運動方程式としてDarcyの法則が成立つと仮定でき、かつまた地下水について上層の浸透層からの流入と、地下水流出とを組合せて連続方程式を立て得るならば、地中における水の運きや流出の遅滞時間等についても理論的に解くことが出来るであろう。しかし土壌の透水性や保湿度、地下水帯の存在状態等については、直接観測出来ない事ゆえに、やはり多くの試行錯誤が必要となろう。

(附記) この報告の一部に、9月の中部地建低水観測担当者会議において報告したものが含まれている。