

草地における初期水分量と流出現象の関係
 Relation between Initial Soil-Moisture and Runoff Phenomena
 on Grassed Soil

東京工業大学工学部 日野幹雄 M.Hino
 水産庁 佐藤昭人 A.Sato
 五洋建設(株) 佐原隆司 T.Sahara

1. はじめに

実際の山地流域での表層土壌は植生に覆われており、土壌のマクロな浸透特性がその植生の影響により大きく変化することは経験的にもまた実験や観測によっても知られている。それ故、ライシメータを用いた降雨実験や不飽和浸透方程式を用いた数値計算等により明確になってきた均一土壌構造場での雨水浸透機構が植生のある土壌場にどう適用できるかを検討することは重要である。雨水浸透現象に及ぼす植生の効果として、土壌構造の団粒化による透水性及び保水性の向上効果、根からの蒸散作用による土壌乾燥促進効果、根と土壌の間の比較的大きなパイプ状の空隙による不均一土壌場としての効果の3つが知られている。土壌構造変化による効果については農林業の分野でかなり研究されており、水文の見地からは不飽和土壌特性の変化として把握できる。また蒸散作用の効果は、いわゆるsink項を考慮して数値計算を行った Karsten Hagh Jensen(1980)の研究等数々の研究が水文分野でもなされている。一方、根のまわりのパイプ状空隙については土壌物理学や植物発生理学の分野で十数年前から存在が確認されるようになったが、植生土壌でのパイプ状の空隙さらに小動物が作る穴や亀裂も含めその水文的效果については透水性が良いと知られているものの研究も比較的少なく必ずしも十分に把握するに至っていない。岡(1986)は、現地調査を行い大空隙の分布状態を調べ、土壌物理実験や数値解析に基づいて大空隙に沿う速い流出の効果の重要性を指摘している。また先に我々もライシメータを用いた実験結果から、裸地のままの土壌と草(稲科の雑草)を植えた同一土壌の湿潤及び乾燥過程が予想以上に大きく異なるものであることを明らかにしている(日野・藤田・出雲 1983)。本研究は、この研究を受け継ぐものとして、同様のライシメータに自然土壌の表層状態に近くなるよう前回よりもゆるく土壌を敷き詰め、人工降雨装置により降雨特性や土壌湿潤状態を制御したうえで裸地と草地の比較実験を行い、植生のある土壌での雨水浸透特性、特に土壌湿潤状態との対応関係を把握し、根のまわりのパイプ状の空隙の水文的效果について基礎的考察を行うことを試みている。

2. 実験装置及び実験条件

1) 実験装置

実験装置として、図-1に示すような深さ70cm、幅40cm、長さ150cm、勾配1:10のライシメータを2体用いている。ライシメータの中には、一様に締め固められた関東ローム土が敷き詰められている。2体のライシメータのうち1体は上層数cmを削り採り芝を敷いたうえで植生を生やしている。土壌表面より深さ10cm、20cm、30cm、40cm、60cmの地点にテンシオメータを埋設しており、雨水浸透に伴う圧力水頭の変化が測定できるようになっている。また左端の流出口から出てきた雨水は、メスシリンダーを用いて詳細に測定できるようになっている。

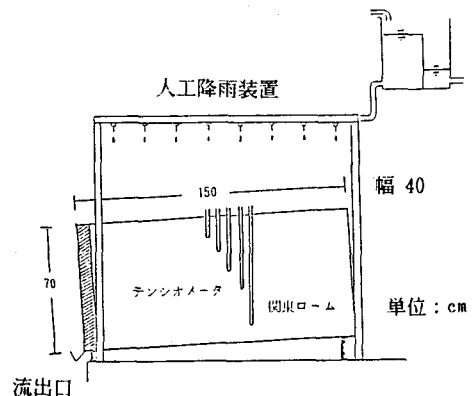


図-1 実験装置の概略図

2) ハイドログラフの逓減部

図-2はほぼ同じ強度（裸地 $R=14.1\text{mm/hr}$, 草地 $R=15.0\text{mm/hr}$ ）の降雨を与えた時の下端からの流出量が定常となった9時間以降のハイドログラフを比較したものである。この図で裸地と草地の逓減部はほぼ一致しているが、これは植生の有無は異なるが同じ締め固め方をした土壌であるからで、両者の土壌特性はほぼ同じと見て良いであろう。

3) 乾燥過程における根系の作用

図-3(a),(b)は、それぞれ裸地及び草地の乾燥過程における圧力水頭の鉛直プロファイルの時間変化を示したものである。左側から降雨後1日おきのデータである。これらの図から、草地は裸地に比べより下層からも乾燥しているのがわかるが、これは主に根の吸い上げによる蒸散効果である。表-1は、8月20日から9月14日までの期間における土壌の水収支を比較したものである。草地では裸地の約2倍の損失量であったが、5月に植えた雑草は7月の終わりには深部まで根が到達していた観測結果や、sink項を考慮した簡単な数値計算の結果からも草地の特性を有した土壌となっていたことがわかる。

表-1 裸地と草地の水収支の比較

裸地	流出量150mm	損失量48mm
草地	流出量88mm	損失量108mm

このように、裸地と草地では土壌特性がほぼ同じで植生の根の効果だけが異なるという土壌条件にしている。実験では、土壌の初期すなわち降雨直前の湿潤状態や、降雨強度等を変え両者の流出現象を比較している。それぞれ、土壌の湿潤状態のみを異ならせて行った実験は5ケース、降雨強度のみを異ならせて行った実験は2ケース、総降雨量のみを異ならせて行った実験は3ケース、乾いた土壌状態で行った流出定常実験は1ケース行っている。

3. 実験結果

1) 草地での初期水分量と流出の関係

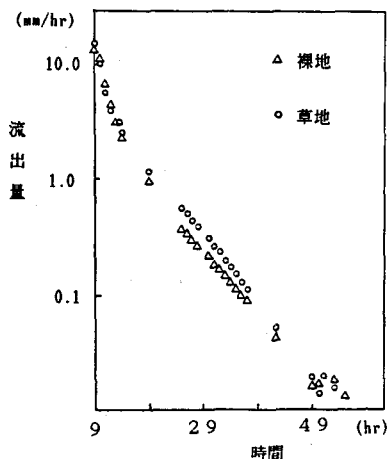


図-2 ハイドログラフの逓減部の比較

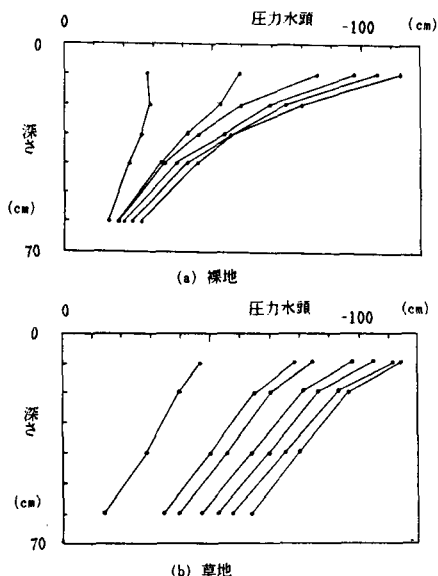


図-3 圧力水頭の乾燥プロファイル

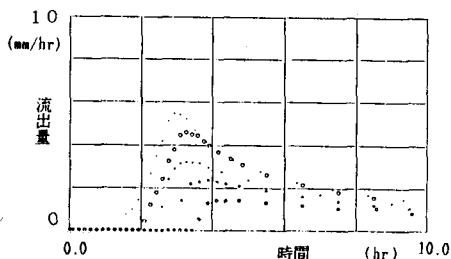


図-4 ハイドログラフの湿潤度による変化

図-4は、初期の土壤湿潤状態のみを変えて行った5ケースの草地のハイドログラフの実験結果を示している。なお5ケースは16mm程度の降雨を約2時間半与えている。初期の土壤の湿潤状態の違いにより、草地でも流出量が大きく異なるのがわかる。先に我々は一次元ライシメータを用いた降雨実験と同定で得られた不飽和土壌特性を用いた不飽和浸透計算において、裸地での初期の土壤湿潤状態と流出量の1つの重要な指標である流出率（総流出量／総降雨量）の関係に明確な対応があることを示した。そこで本実験の草地についてその対応関係をプロットしてみた。図-5はテンシオメータを埋設した各地点の初期の圧力水頭と流出率の関係を示している。草地でも初期圧力水頭と流出率の間には明確な対応関係があり、流出現象のTotal量については草地においても裸地同様な議論が可能であることが確かめられた。すなわち、草地でも流出終了時における圧力水頭の鉛直分布が毎回同じ状態であり、降雨開始前のそれとの差の主な要因である蒸発散量によって大きく支配されるのがわかった。

また図-6及び図-7は、それぞれ草地における土壌深さ20cmの地点の初期圧力水頭と流出遅れ時間及びピーク流量の関係をプロットしたものである。なお裸地と草地は圧力水頭の鉛直プロファイルも異なるので直接比較はできないが、参考に裸地の実験結果も合わせて示している。ピーク遅れ時間等についてもこのような対応関係があり、草地での流出現象は初期圧力水頭と明確な対応関係があることがわかる。一方、草地における流出開始時の圧力水頭の鉛直分布を一緒にプロットしてみると一見裸地に比べランダム性を有するようであったが、初期圧力水頭を指標とし流出開始時の各地点の圧力水頭で整理してみるとそうでもない。図-8は一例として深さ60cmの地点の初期圧力水頭と流出開始時圧力水頭の関係を示したものである。これらのことから草地での流出現象は、Total量だけでなく浸透機構自体も、初期の土壤湿潤状態とシステムチックな対応関係があることが確かめられた。そこで根のまわりの空隙の効果による速い浸透と土壤湿潤状態の関係についてはどうか検討を試みている。

2) 草地と裸地の比較

図-9(a), (b)は、各々ほぼ同じ湿潤した土壌状態の裸地及び草地について、強度 30mm/hrと強度17mm/hr

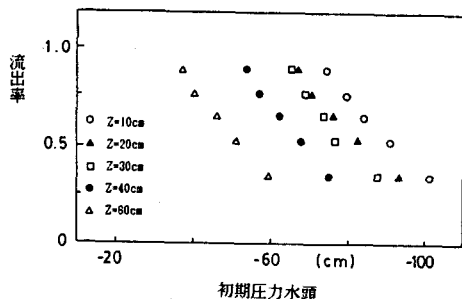


図-5 初期圧力水頭と流出率の関係

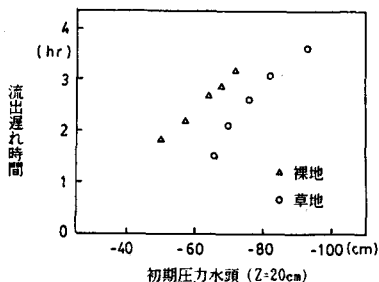


図-6 初期圧力水頭と流出遅れ時間の関係

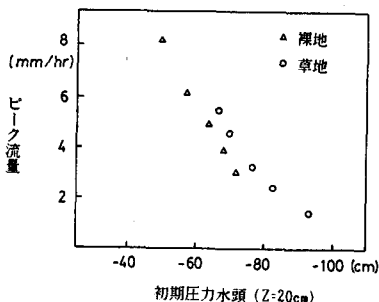


図-7 初期圧力水頭とピーク流量の関係

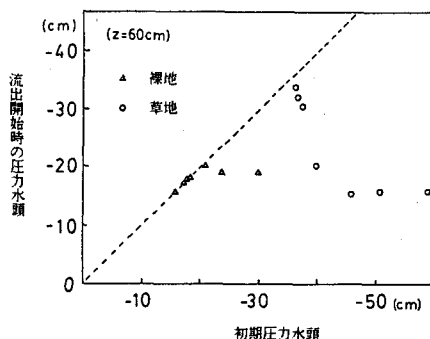
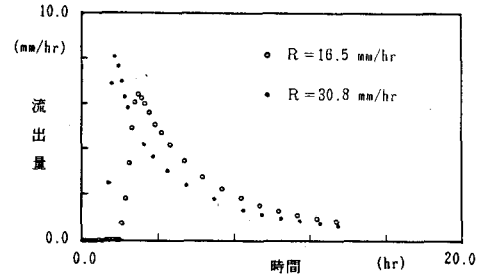


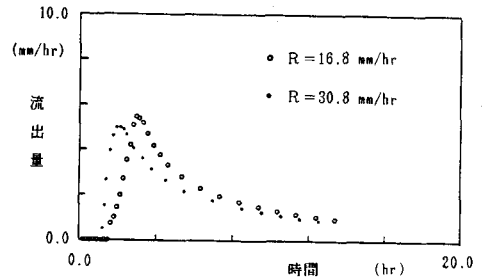
図-8 初期圧力水頭と流出開始時の圧力水頭の関係

の降雨を40mm与えたときのハイドログラフを示したものである。実験ケースが少ないことにより明確に検討するに至っていないが、根のまわりの空隙による速い浸透の影響が奇妙なことに草地では降雨強度が大きい方がピークの逡減効果は大きい。図-10は、16mm/hrの強度で総降雨量 20mm, 40mm, 60mm を与えたときの、総降雨量と流出遅れ時間及びピーク遅れ時間の関係をプロットしたものである。裸地と草地それぞれ3ケースとも前降雨から3日後で損失量 (= 総降雨量 - 総流出量) が 4mm程度のほぼ同じ湿潤土壌状態に設定している。ピーク流量の関係等も合わせて考えると、湿潤した草地では根のまわりの空隙による速い浸透によって流出が裸地より3ケースとも早く現れること、土粒子間を通る浸透がピークに支配的になることによってピーク遅れ時間は裸地と変わらなくなることが推測できる。また図-11は、総降雨量40mmのケースの裸地と草地のハイドログラフを比較したものであるが、根の効果で草地は裸地に比べ流出開始が早くピークも低くなりなだらかな形状を有していることがわかる。

このような湿潤した草地での流出が早く起こる機構を把握するために、各深さのテンシオメータが降雨の浸透に伴い落ち始めるまでの時間(応答時間)を検討してみた。その結果、草地は裸地に比べ、土壌上層の浅いところではほぼ同じような応答時間であるが、深さ 40cm から 60cm まではかなり早い応答を示していることがわかった。特に、草地では湿った初期土壌状態のとき、深さ 60cm の地点のテンシオメータが応答してから数分で流出が起こっており、流出開始を早めるのは特に深い土層部であると考えられる。その傾向を明らかにするために、深さ 10cm, 20cm, 30cm の90分間のデータによって同定した土壌特性を用いて簡単に浸透計算を試みた。図-12(a), (b) は裸地において降雨に伴う10分おきの圧力水頭の時間変化の実験結果及び計算結果を示したものである。このように裸地の場合には深いところの圧力水頭の時間変化も計算と実験が合っていること、また流出時間も一致していることにより、十分実験を再現していると考えられる。一方草地の場合の実験と計算を比較してみると、深いところでの圧力水頭の変化については計算結果が実験結果よりかなり遅れており、実験で得られたような早い流出が再現できていない。このことは、先程述べたように深い土層部で草地は裸地に比べ速い浸透があること



(a) 裸地



(b) 草地

図-9 降雨強度による効果

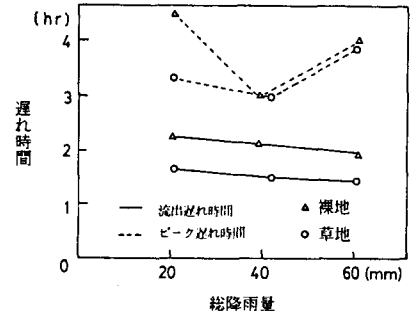


図-10 総降雨量と遅れ時間の関係

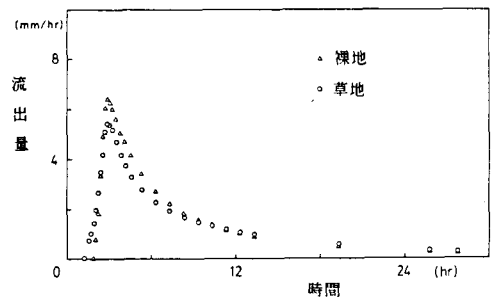


図-11 裸地と草地のハイドログラフの比較

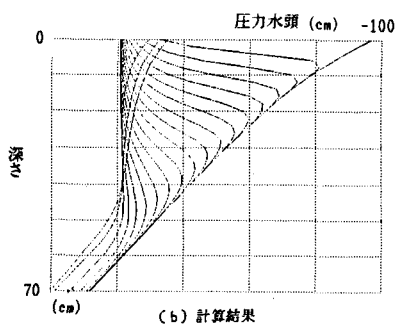
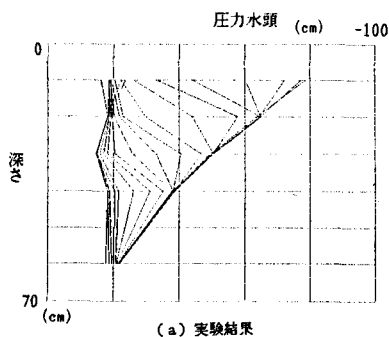


図-12 圧力水頭の浸透プロファイル (裸地)

を示唆するものと思われる。

土壌の深いところは湿っているので、見方を変えれば、土が湿っていると草地では根のまわりの比較的大きな空隙の効果が顕著となると考えられる。そこで、土壌の湿潤状態の効果を検討するため、土壌を乾燥させ初期状態を変えて行っている実験結果から損失量とピーク遅れ時間及び流出遅れ時間の関係をプロットしてみた。図-13及び図-14はそれぞれこれらの関係を示したものである。これらの図から、ピーク遅れ時間については裸地と草地はほとんど変わらないこと、流出遅れ時間は、損失量が少ないすなわち土壌がかなり湿っている状態の時にこれまで示してきたように早くなっているが、土壌が乾くに従い、裸地とあまり変わらなくなっていくのがわかる。すなわち、検討してきた草地における根のまわりの比較的大きな空隙を通る速い浸透は、初期の土壌が十分湿っているときに起こるものであり、土壌が乾く程根のまわりの空隙の効果は小さくなるものと考えられる。そこで、かなり乾燥させた土壌状態のもとでの降雨実験を行った。図-15は

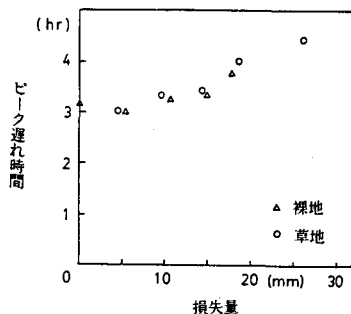


図-13 損失量とピーク遅れ時間の関係

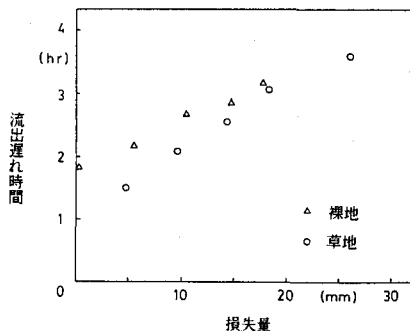


図-14 損失量と流出遅れ時間の関係

強度15.5mm/hrの降雨を流出が定常状態になるよう23時間与え続けた時の草地の圧力水頭の時間変化を示したものである。この草地の圧力水頭の変化のパターンは裸地のそれと同様な傾向で雨水が浸透していることを示唆しており、また流出の方も図には示していないが、草地において湿った土壌状態の時に見られた早い流出に伴うなだらかなハイドログラフの上昇パターンは見られない。すなわち裸地同様な現象であり、根の効果が顕著でないと考えられる。

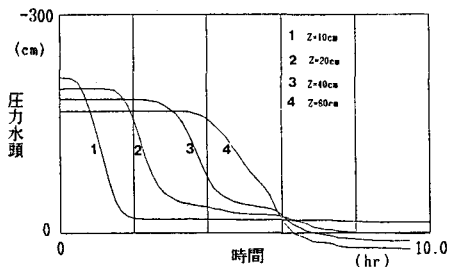


図-15 乾いた土壌状態での圧力水頭の時間変化

4. モデル実験

これまでは植生のある不均一土壌場での浸透特性を検討し、土壌が乾燥するにつれ、根のまわりのパイプ状の空隙に沿った浸透効果は必ずしも重要でないことが、本実験結果で認められた。しかし、実際に観察していないので、根のまわりの水みちの効果をより明確にするため雨水浸透過程の観察を行う必要がある。浸透過程における根の効果としては、根の水分吸い込みの効果は小さいので、根と土壌の間の比較的大きなパイプ状の空隙がもたらす水みちとしての効果だけを考えれば良いであろう。そういう点において、浸透過程における根は生物としてよりも物としての効果と考えられる。そこで、根の代わりに表面をペンキで塗装した竹ひごを用いて、簡単なモデル実験を試みた。図-16は、実験装置の概略図を示している。竹ひごは直径が5mmであり、3箇所合計12本均等に差し込んでいる。一例として図-17(a),(b),(c)は、湛水が生じない程度の強度37.5mm/hrの降雨を与えた時のそれぞれ降雨後10分、20分、30分経過した時の湿润前線の様子を示したものである。浸透は多少竹ひごのまわりで速くなるが、ほぼ一様に鉛直浸透していくのがわかる。また竹ひごを抜いて空洞とし、3cmの湛水を上部に与えたケースでは、湿润前線が降下するに連れて次第に水平分量の面内の分布が一様化していった。

5. おわりに

本研究では、ライシメータを用いて裸地と草地の比較実験を行い、植生のある土壌での雨水浸透特性、特に土壌湿润度との関係に着目し検討を行った。その結果、草地における不均一土壌においても裸地同様、流出率等の流出現象と初期の土壌湿润度には明確な対応関係があること、また、根のまわりのパイプ状の大きな空隙による従来から指摘されてきた速い浸透は、土壌湿润状態に依存しており乾いた土壌状態では必ずしも顕著としないことが確認できた。

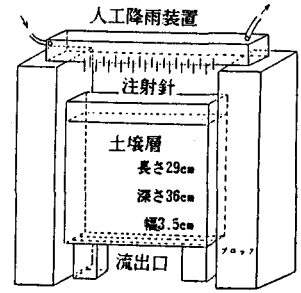


図-16 実験装置

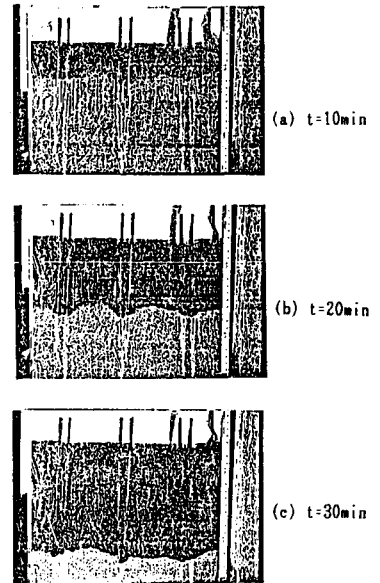


図-17 湿润前線の時間変化

参 考 文 献

- 1) Karsten Høgh Jensen: Prog.Rep., vol.52, pp15-25, 1980.
- 2) R.Scott Russel: Plant Root Systems.,Mc.Graw-Hill Book Company Limited, 1977,(田中典幸訳,作物の根系と土壌,農山漁村文化協会).
- 3) 岡太郎:第41回年次学術講演会, pp25-26, 1986.
- 4) 日野・藤田・出雲:第27回水理講演会論文集, pp415-418, 1983.
- 5) 日野・澁岡・尾高・佐藤:第29回水理講演会論文集, pp127-130, 1985.
- 6) 佐藤・澁岡・日野:第41回年次学術講演会, pp23-24, 1986.
- 7) 日野・澁岡・佐藤:第30回水理講演会論文集, pp379-384, 1986.
- 8) 日野・佐藤・佐原:第42回年次学術講演会, pp112-113, 1987.