

II-30

室蘭流出試験地における流出機構について

室蘭工業大学 正員 藤 間 聡
室蘭工業大学 学生員 熊 谷 恭 人

1. はじめに

著者らは1988年より室蘭に流出試験地を設け、降雨-流出量に関する水文観測を行い、先行降雨の有無による土壌の湿潤状態が試験地の流出特性に強く影響を与えていることを見いだした¹⁾。このことから土壌特性である水分特性曲線と不飽和透水係数の測定を行い、水分特性曲線からVan Genuchten 式を用いて不飽和透水係数の定式化を行った²⁾。この結果、流域土壌内における側方浸透流発生機構を定性化するに至った。しかし、この側方浸透流の発生機構に関する考察は、あくまで理論的なものであり、試験地における実現象が考察のようなメカニズムにより側方浸透流を発生するか否かは定かではない。

以上の見地から本研究は異なる2種類の砂試料を用いた2層からなる成層土壌の浸透現象についての室内実験を行い、流出試験地における雨水浸透過程を物理的に考察するものである。

2. 試験地の浸透機構における考察

本流域の構成土壌は、土壌表面から A_{00} 、 A_0 、 A_1 層の3層より構成される。この内、主に降雨-流出に関係する土壌が A_0 、 A_1 層であると考え、各土壌における水分特性曲線と不飽和透水係数を室内実験により測定し、Van Genuchten 式を用いて定式化を行った。

図-1および図-2は、それぞれ A_0 、 A_1 層の排水、吸水過程における水分特性曲線および不飽和透水係数を示す。また、表-1に各土壌の飽和透水係数を示す。

表-1. 飽和透水係数(cm/s)

	A_0 層	A_1 層
飽和透水係数	0.00146	0.00268

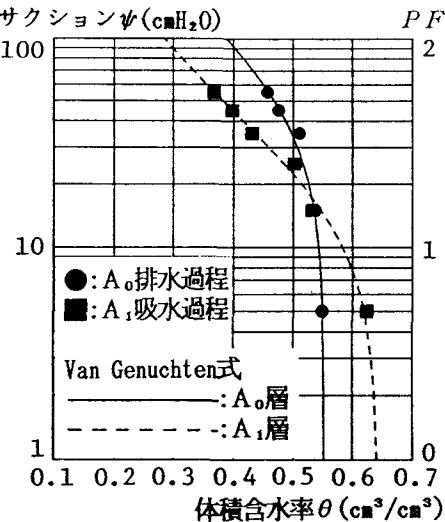


図-1. 水分特性曲線

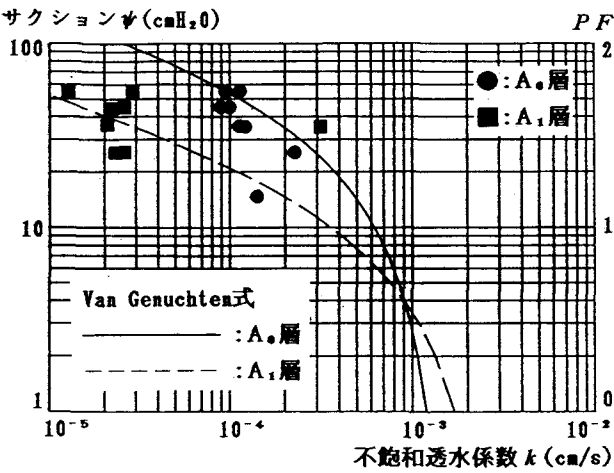


図-2. 不飽和透水係数

この結果から、図-3を用いて流出試験地における雨水浸透過程の考察を行う。

Study on Runoff Process in the Muroran Experimental Basin
by Satoshi TOHMA, Yasuhito KUMAGAI.

A_0 および A_1 層への雨水の浸透過程は以下のように考えられる。

図-3 ①：雨水は A_0 層の吸水サクションにより土層表面に対して垂直に浸透し、 A_0 層の飽和度の増加に伴い重力の作用を受け鉛直方向へ浸透方向を変化させる。土壌が乾燥状態である場合、初期降雨の大部分が A_0 層内に貯留される。

降雨の継続により、 A_0 層内に浸透した雨水は A_1 層との境界面に達する。しかし、初期の浸透は不飽和状態で生じるため A_1 層の透水係数は A_0 層より小さい。従って、 A_1 層は雨水の遮水層の役割を果し、境界面に不飽和側方浸透流を発生させ、斜面下方に飽和帯を形成する。

図-3 ②：不飽和側方浸透流の発生および A_0 層内の飽和帯の形成により、土層境界面における飽和度を増す。このため A_1 層の透水係数は A_0 層よりも大きくなり、境界面における雨水の浸透方向は斜面下方に屈折する。

降雨の継続により A_0 層に発生した飽和帯は斜面上方へ領域を増大させ、 A_1 層も境界面に同様の飽和帯を形成し飽和側方浸透流を発生させる。

以上、本流出試験地における雨水浸透過程について定性的に説明した。次に実流域の浸透過程において A_1 層が A_0 層の遮水層となり得るのか否かを室内実験により検証する。

3. 雨水浸透実験

実験は、異なる2種類の成層砂試料に疑似降雨を与え、試料内における雨水の浸透現象を視覚的および定量的に観察する。

3-1. 実験装置

実験装置は雨滴発生装置、水分量測定用装置、転倒マス式雨量計である。

3-1-1. 雨滴発生装置

雨滴発生装置（大起理化工業株式会社製D1K-6000-S）の概要を図-4に示す。本装置は給水口からノズル（針）を通じて降雨を発生させるもので、0～150mm/hの有効降雨強度（小流量時）および150～400mm/hの有効降雨強度（大流量時）の降雨の発生が可能である。

有効降雨面積は、大流量時には全ノズル（針）、1056本に水が供給され0.89m²となり、小流量時には水が供給されるノズルが272本になるため0.86m²となる。装置上部には振動用モーターが付属され、雨滴径は2.0～3.0mmの範囲で変動させることが可能である。

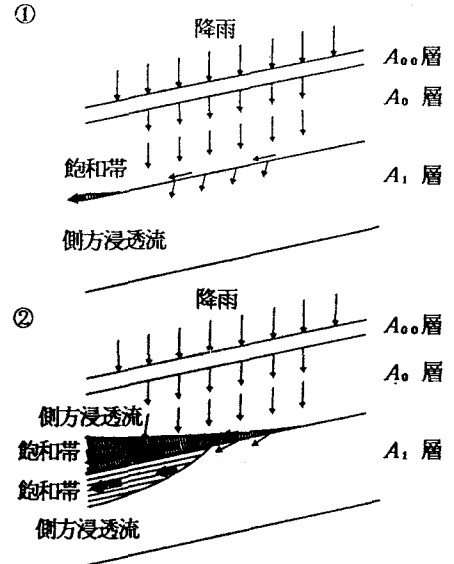


図-3. 成層土壌における雨水の浸透

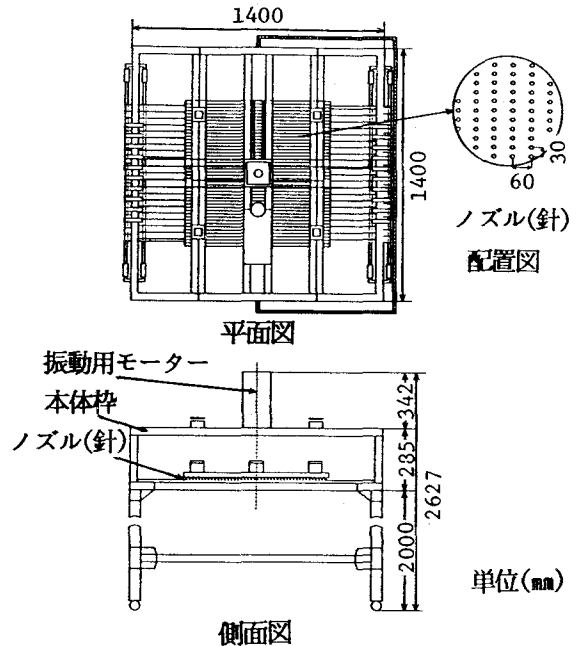


図-4. 雨滴発生装置

3-1-2. 水分量測定装置

水分量測定装置の概要図を図-5に示す。装置は内径7.5cm、高さ5cmの4本の塩ビパイプを縦につなげ、上部塩ビパイプ1、2層と3、4層に異なる透水係数の試料を詰めて実験終了後、各層の含水量の測定を可能としている。装置下部には粗砂を詰めた同一内径、高さ20cmの塩ビパイプを取り付け、境界面に第4層に詰めた試料の流下を防ぐためフィルターを取り付けている。

3-2. 実験方法

実験は4本の水分量測定装置を雨滴発生装置の有効降雨面積内中央に、また転倒マス式雨量計を所定の場所に設置し、雨量強度30mm/hの矩形分布降雨を発生させる。その後、2種類の試料の境界部分に浸透水が到達する時間の10分前から5分刻みに水分量測定装置を1本ずつ取り出し、上部4層を図-5のように切断して、各層に貯留された水分量の測定、および切断面と縦方向の浸透状況をスケッチする。また、実験結果の整理は以下に定義する含水量(g)と重量百分率(%)を用いた。

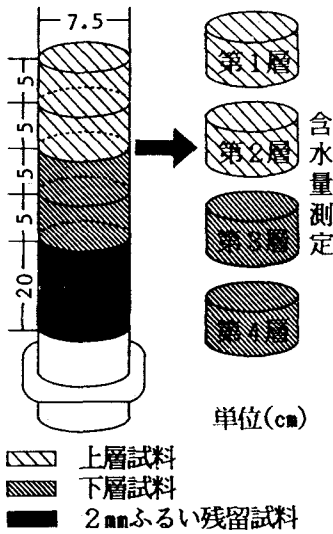


図-5. 水分量測定装置

含水量(第n層) = 第n層に貯留された雨水の水分量(g)

重量百分率(第n層) =
$$\frac{\text{第}n\text{層に貯留された雨水の水分量(g)}}{\text{全層(1+2+3+4)に貯留された雨水の水分量(g)}} \times 100$$

ここで、n=1,2,3,4.

3-3. 実験試料

実験試料は海砂0.42mmふるい残留試料(均一粒径)、0.10mmふるい残留試料(均一粒径)および天然珪砂(平均粒径0.25mm)の絶乾試料を用いる。各試料の定水位透水試験によって求めた飽和透水係数を表-2に示す。こ

表-2. 飽和透水係数

試料L	(0.42ふるい残留試料)	$8.70 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$
試料M	(天然珪砂)	$2.02 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$
試料S	(0.10ふるい残留試料)	$1.30 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$

で試料は簡易表示のため以後、飽和透水係数の大きい順に試料L、試料M、試料Sとする。

実験試料は空隙率により透水係数が著しく変化すると考えられるため、砂質土壌の空隙率が約30~40%の値を取ることを考慮に入れ、空隙率35±5%の範囲内になるように試験器に詰める。

4. 実験結果

実験は試料L、M、Sを組み合わせ、4種類について行った。また、各組み合わせによる実験は、それぞれ3回ずつ行い、その平均値により実験データを整理している。

4-1. Case-1 (上層試料L、下層試料S)

Case-1は上層に試料L、下層に試料Sを用い実験を行った。また実験装置は5, 10, 15, 20分で取り出し、浸透観察および含水量を測定する。

図-6は20分経過後の縦方向の浸透観察スケッチである。図に示すように、上層試料Lは第1層上面から約2cmまで全体に浸透し、その後、幅約2cmの雨水浸透経路(以後、水みちと称する)を形成し下層

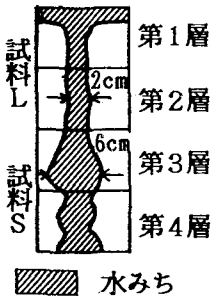


図-6. 浸透観察スケッチ

試料Sへ雨水を浸透させる。下層試料Sも試料L同様、水みちを形成するが、試料Lが水みちの幅をほとんど変化させないのに対し試料Mは水みちの幅を拡大させる。

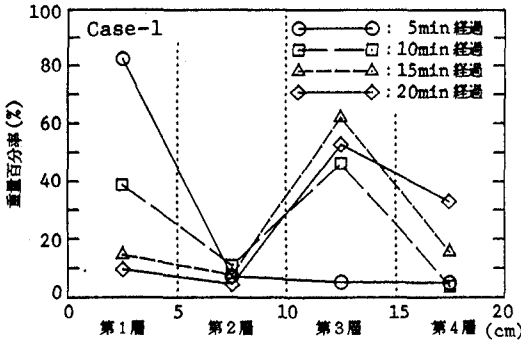


図-7. Case-1 重量百分率

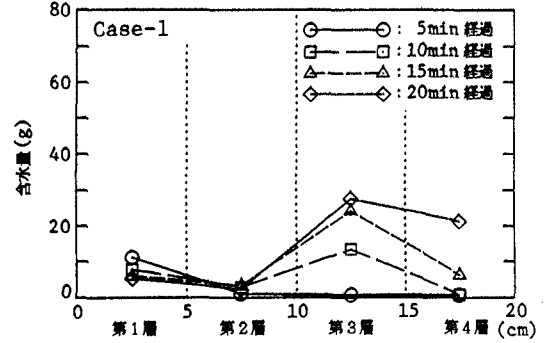


図-8. Case-1 含水量

図-7はCase-1における時間経過ごとの各層の重量百分率を、また図-8は含水量を示す。図-7より、雨水は5分経過時において第1層にしか浸透しないが、10分経過後には第2層および第3層への浸透が生じ、15分が経過すると雨水は第4層にまで浸透する。また、第1層および第2層の含水量は、時間が経過しても増加せず、第3層も同様に15分が経過すると含水量の大きな増加は示さない。

以上から、Case-1における境界面の浸透は速やかに生じることが分かる。

4-2. Case-2 (上層試料L、下層試料M)

Case-2は上層に試料L、下層に試料Mを用い実験を行った。また、実験装置はCase-1同様、5, 10, 15, 20分で取り出した。

Case-2における浸透観察の結果、試料LはCase-1同様、水みちを形成し下層試料Mへ雨水を浸透させるが、下層試料Mは試料Lの様な明確な水みちを形成せず横方向への浸透を卓越させることを確認した。

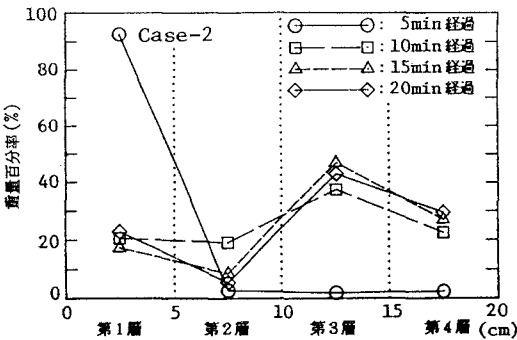


図-9. Case-2 重量百分率

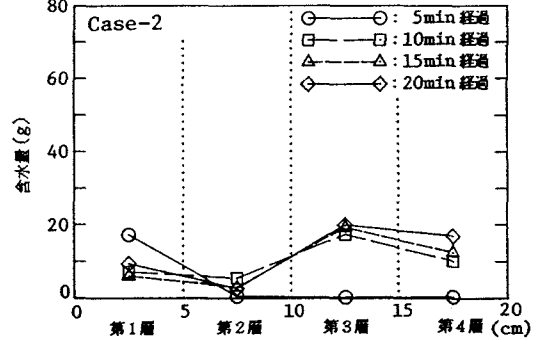


図-10. Case-2 含水量

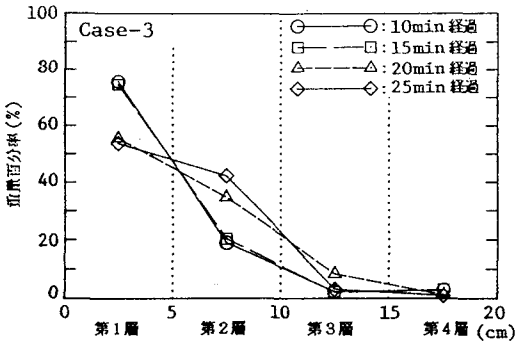
図-9はCase-2における時間経過ごとの各層の重量百分率を、図-10は含水量を示す。両図より、重量百分率および含水量は、Case-1と同様の傾向を示している。

4-3. Case-3 (上層試料S、下層試料L)

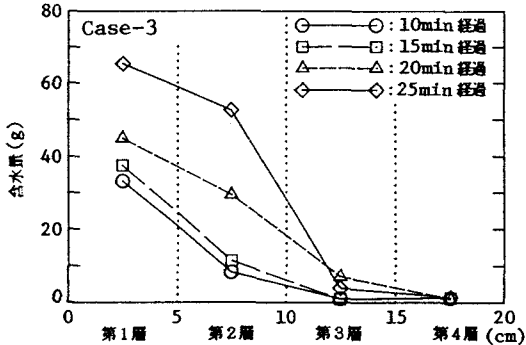
Case-3は上層に試料S、下層に試料Lを用い実験を行った。また、実験装置は10, 15, 20, 25分で取り出した。

Case-3における浸透観察の結果、試料Sは試料Lと同様に水みちを形成するが、その幅は試料Lより

も大きい。また、15分経過で雨水は第3層上面まで浸透するが20分、25分を経過しても第3層内への浸透は生じない。



図－1 11. Case-3 重量百分率



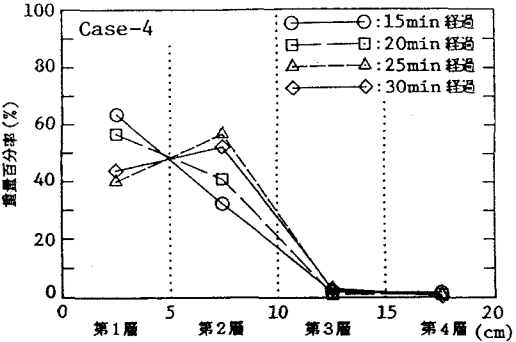
図－1 12. Case-3 含水量

図－1 11はCase-3における時間経過ごとの各層の重量百分率を、図－1 12は含水量を示す。図－1 1より、雨水は10分が経過すると第1層および第2層へ浸透する。また、20分が経過すると雨水の浸透は第2層と第3層の境界面に完全に到達するが、第3層への浸透は生じず、25分が経過しても雨水の第3層への浸透は見られない。一方、測定時間内における含水量は常に第1層が大きいが、雨水が境界面に到達すると、第2層へ貯留される傾向を示す。

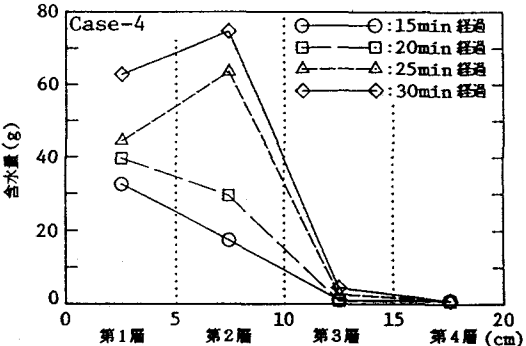
4-4. Case-4 （上層試料M、下層試料L）

Case-4は上層に試料M、下層に試料Lを用い実験を行った。また、実験装置は15, 20, 25, 30分で取り出した。

Case-4における浸透観察の結果、試料Mは試料L、Sと異なり明確な水みちは形成せず、第3層への浸透もCase-3と同様に30分が経過しても生じない。また、Case-3とCase-4における第3層上面への雨水の浸透到達時間は、試料MがSより飽和透水係数が大きいにもかかわらず、Case-3が速い。



図－1 13. Case-4 重量百分率



図－1 14. Case-4 含水量

図－1 13はCase-4における時間経過ごとの各層の重量百分率を、また図－1 14は含水量を示す。重量百分率および含水量ともCase-3と同様の傾向を示すが、Case-3で見られた、第2層へ雨水が貯留する傾向は、Case-4では顕著に表れ、25分が経過すると、第2層の含水量が第1層よりも大きくなる。

4-5. 実験結果の考察

境界面における雨水の浸透過程を見ると、Case-1およびCase-2において、試料の境界層である第2層

から第3層への雨水の浸透は、第3層上面に雨水が到達すると同時に速やかに生じ、第3層内に雨水が貯留する傾向を示す。これに対しCase-3およびCase-4は第3層上面に雨水が到達しても、第3層内への浸透は生じず、雨水は第1層および第2層に貯留される。

雨水の浸透は重力と試料内のサクシオンに規定されるため、成層土壌において、鉛直方向の雨水の浸透は重力とサクシオンに、また水平方向はサクシオンにのみ支配される。このためCase-3およびCase-4に生じる第2層内の雨水の貯留は、上層試料のサクシオンが下層試料のサクシオンと重力による合力を上回るために生じると考えられる。ここで、試料Lおよび試料Sは、均一粒径であるため非常に大きな空隙系を形成する。一方、試料Mは試料Lおよび試料Sよりも粒度分布の良い試料であるため大空隙は形成しづらい。また、試料Sが水みちを形成するのにに対し試料Mが水みちを形成しないことから、試料のサクシオンはM、S、Lの順に大きいと考えられる。従って、Case-1およびCase-2はサクシオンの小さい試料から大きい試料への浸透のため、境界面における浸透が速やかに生じ、また、Case-3およびCase-4はサクシオンの大きい試料からサクシオンの小さい試料への浸透のため、第2層への雨水の貯留が生じる。

一方、水みちは重力による浸透がサクシオンによる浸透より卓越するために形成される。ここで、Case-3とCase-4における第3層上面への雨水の到達時間は、試料Sよりも試料Mの方が飽和透水係数が大きいにもかかわらず、Case-3で約15分、Case-4で約20分とCase-3の方が速い。この結果から、水みちを形成する試料S、Lは、試料内で形成される大空隙を通じて雨水を下層へ浸透させる。

5. 結 論

雨水浸透実験より以下の結論を得た。

- 1) 均一粒径の試料は水みちを形成し、水みちを通じて雨水を下層へ浸透させる。水みちは試料内に大空隙が存在するとき形成され、この空隙を通じて雨水が浸透する現象であると考えられる。
- 2) 2層の境界面における雨水の浸透機構は、それぞれの試料のサクシオンに支配され、上層試料のサクシオンが下層試料のサクシオンを上回る場合、雨水は上層試料に貯留され、上層試料のサクシオンが下層試料のサクシオンと等しくなるまで境界面における雨水の浸透は生じない。また、下層試料のサクシオンが上層試料のサクシオンを上回る場合、境界面における雨水の浸透は速やかに生じる。

以上の結果より、境界面における雨水の浸透過程は、上層土壌のサクシオンと下層土壌のサクシオンに支配されることが判明した。ここで、流出試験地において2)に述べた現象を適用する。

図-1に示した水分特性曲線より、 A_0 、 A_1 層のサクシオン $16\text{ cmH}_2\text{O}$ 以上における体積含水率は、同一サクシオンにおいて A_0 層の方が A_1 層よりも高い。このため、降雨初期における土壌内の雨水の浸透はCase-3およびCase-4と同様に A_0 層内でのみ生じる。この時、雨水は A_0 層内に貯留されると同時に、 A_1 層との境界面に飽和帯を形成する。その後、 A_0 層の飽和度の上昇とともに境界面におけるサクシオンは低下しCase-1およびCase-2に見られる様に A_1 層上面に飽和帯を形成する。

従って図-3で示した試験地の雨水浸透機構は実験的に検証されたと考えられる。

本研究を進めるに当たり、実験、その他について室蘭工業大学土木工学科河海工学講座の学部学生、鈴木康規、瀧田学両君の協力を得たことを付記し、謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 藤間・熊谷: 不飽和土壌中の雨水流出機構に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第47号、pp. 459-464, 1991.
- 2) 藤間・熊谷: 不飽和土壌における透水性の評価について、土木学会第45回年次学術講演概要集(2)、pp. 182-183, 1991.