

粗大空隙材料中の水の運動

Movement of water through macroporous media

京都大学農学部 学生員 ○太田 岳 史

京都大学農学部 正 員 福 嶋 義 宏

京都大学農学部 正 員 武 居 有 恒

1. はじめに

流域ハイドログラフは、タンクモデル法、kinematic・wave法等で再現、予想することができる。しかし、流出場及びそこでの流出機構については今だ不明の点が多い。速い流出成分については、地表面流として解析される場合が多いが、林地において地表面流が観察された例は少なく、観察されてもその量は地表面下の流出量と比較して少ない¹⁾。

このように考えると、地表面下に速い流出成分を形成する場が存在すると思われる。一般に林地の透水係数は、 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と考えられるが、このオーダーで速い流出成分を形成することは考え難い。そこで、速い流出成分を形成する場としてHumus層が考えられる。Humus層は、地表面下5～10cmに存在し、根系が密にマット状となり、土粒子をほとんど含まない層である。この層の構造上の特長として考えられるのは、砂層等に代表される一般のporous mediaと比較して、空隙率が著しく大きいことである。ここでは、このような材料を粗大空隙材料と呼ぶこととする。

本研究では、Humus層中に飽和水深が発生した場合のこの層中における水の運動及びそれを支配する要因を明らかにする目的で水路実験を行い、考察を加えた。

2. 従来の研究

porous mediaの中の流れは、Darcy則に従うとされている。しかしまた、Darcy則から逸脱することも指摘されており、J. P. SONI²⁾らは、

$$v = MI^n \quad (1)$$

v : 平均流速 I : 動水勾配 M, n : 定数

の関係において、 I が増加すると n は1.0からはずれ0.55になることを示した。平均流速は勾配のほぼ $1/2$ 乗に比例すると考えられる。そして、土中の流れが層流から乱流へ移行する限界レイノルズ数は、ほぼ1.0であるとされている。

また、林地Humus層のような構造を持つ材料中の流れに関しては、高棹・岸本³⁾によるガラスウール中の流れの実験が挙げられる。それによれば、透水係数 $k = 2.0 \text{ cm/sec}$ でガラスウール中の流れは、Darcy則に従うとされている。

一方、表面流に関する研究は、過去数多くなされている。高棹・岸本³⁾は、上記のガラスウール上の流れについて、 $n = 0.3 \sim 0.4$ の値を得ている。また、V. J. PALMER⁴⁾は、植生のある水路上の流れでLow flowの場合、水みちを形成するが、 $n = 0.2 \sim 0.4$ の値を得ており、高棹らの結果と一致している。杉山⁵⁾は、人工芝を用いた水路実験の結果、芝内の流れはDarcy則、芝上のみ流れはMannig則、そして両者を同時に評価した場合には層流則に従うことを指摘した。

3. 実験方法及び結果

3・1 実験方法

表層材料として、非攪乱の現地Humus層2種(共にヒノキ林で、材料1は斜面上部で勾配2.5°, 材料2は斜面下部で勾配3.8°)、ガラスウール及びそれを加圧して密度を変化させたもの3種、ネット(直径0.02

cmの硬質塩化ビニル製ネットを重ね合せた), 平均粒径0.5 cmのガラスビーズ, 平均粒径0.02 cmの標準砂の計9種類を用いた。各材料の諸元は表-1に示す通りである。

表-1 表層材料諸元

	Depth of surface layer (cm)	Diameter (cm)	Void ratio (%)	Surface area (cm ² /cm ³)
Humus 1	5.5	0.06	0.857	9.53
Humus 2	6.0	0.06	0.908	6.13
Net	2.4	0.02	0.899	20.23
Glass wool	6.5	0.01	0.956	17.66
Pressured glass wool 1	5.0	0.01	0.942	23.22
Pressured glass wool 2	4.5	0.01	0.936	25.60
Pressured glass wool 3	3.5	0.01	0.918	32.82
Glass beads	3.0	0.5	0.357	7.66
Sand	6.5	0.02	0.638	108.60

実験水路は, 巾0.19 m, 長さ1.5 mである。底面には, 現場の状態に近づけるため, Humus 層(材料1)直下の砂粒をワセリンで固定してある。また, 水位測定のためピエゾメーターを水路下流端より10, 18, 35.5 cmの3点に設定した。勾配は, 2°, 3°, 5°, 10°, 15°, 25°のうち各材料で2~6勾配を用いた。

給水は, 定ヘッドタンク・整水槽を経て, 水路上流端より一定流量を与えた。流量の調節は, 定ヘッドタンク直下に設置したバルブで行ったが, 標準砂の場合のみ微流量計(レンジ50~800 cc/min)を付加して行った。下流端流量は, メスシリンダーにより10~60秒間実測した。材料中の水位は, 下流端流量が定常した後読み取り, その平均値を用いた。なお, 各ピエゾメーターの水位にほとんど差はなく, 測定区間での水面勾配は水路勾配と同一に見なせた。

3・2 h-q 関係

流れの抵抗則を検討する場合, f-Re関係が用いられるのが一般的である。しかし, 斜面流を解析するにあたっては, h-q 関係を用いるのが一般的であり, しかも実用的と考えられる。そこで, 以下h-q 関係を用いて検討を行うことにする。

h-q 関係は,

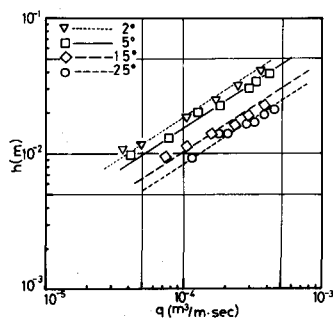
$$h = kq^p \quad (2)$$

で示される。ここで, k, p は定数であり流れの形態によって以下のように表示される。

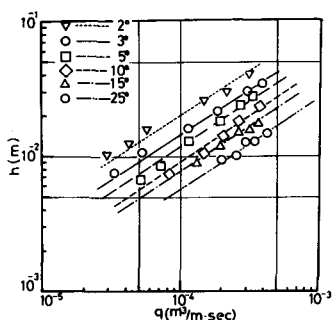
$$\begin{aligned}
 &\text{層流形式} & k &= (3\nu/gI)^p & p &= 1/3 \\
 &\text{Manning 形式} & k &= (n/\sqrt{I})^p & p &= 3/5 \\
 &\text{Chezy 形式} & k &= (1/C\sqrt{I})^p & p &= 2/3 \\
 &\text{Darcy 形式} & k &= (\lambda/kI)^p & p &= 1.0
 \end{aligned} \quad (3)$$

ν : 動粘性係数 g : 重力加速度 I : 勾配
 n : Manning の粗度係数 C : Chezy の流速係数
 λ : 空隙率 k : 透水係数

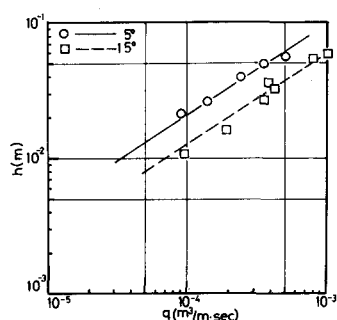
各材料についてh-q 関係は図1(a)~(i)に示す通りである。一般に, porous media中ではDarcy則が成立する。この時, (3)式で明らかのようにh-q 関係は45°の傾きの直線となり, これは線形の関係を示す。そして, (1)式で示される乱流域でのDarcy 則に関しては, 定数kと勾配Iの関係が層流の場合と変化するのみで, pの値は変化しない。しかし, 現地Humus層, ガラスウール及びネットに関しては, いずれも明らかに45°より小さい傾きの直線, つまりpが1.0より小さい関係が成立している。これは, 流れがDarcy則から逸脱し, 水深の増加とともに平均流速が増加する関係を示している。



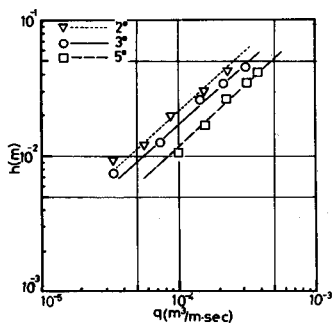
(a) Humus 1



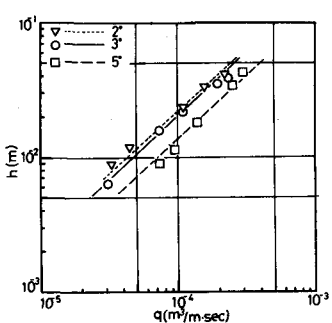
(b) Humus 2



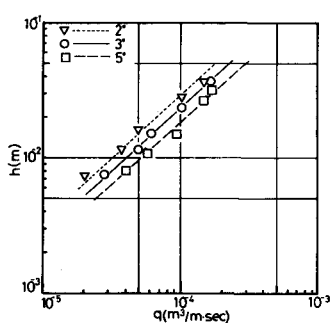
(c) ガラスウール



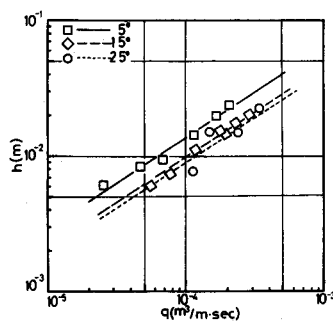
(d) ガラスウール 加圧 1



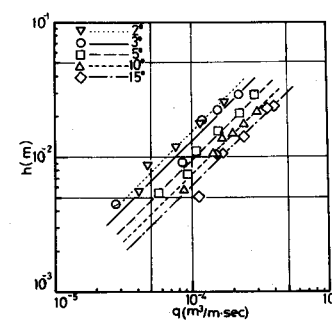
(e) ガラスウール 加圧 2



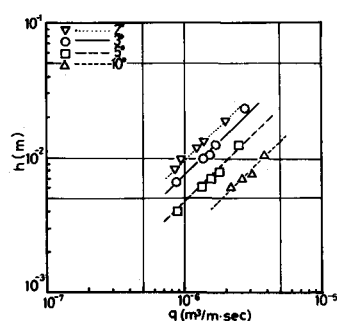
(f) ガラスウール 加圧 3



(g) ネット



(h) ガラスビーズ



(i) 標準砂

図-1 h-q 関係

4. 考 察

4・1 流れの形態

3・2の結果より、粗大空隙材料中においては、 $h-q$ 関係が $p < 1.0$ になる流れが生ずることが明らかになった。ここでは、各材料中の流れが先に示した既存の運動測のいずれに近い形態を示すかに関して、検討を進める。

各流れの形態について、定数 k と勾配 I の関係は、

$$k = a I^m \quad (4)$$

の形で表わすことができる。そして、 m の値は(3)式より以下のように定まる。

$$\begin{aligned} \text{層流形式} & \quad m = -1/3 \\ \text{Manning形式} & \quad m = -3/10 \\ \text{Chezy形式} & \quad m = -1/3 \\ \text{Darcy形式} & \quad m = -1.0 \end{aligned} \quad (5-a)$$

また、SONI らの結果から(2)式より、

$$\text{Darcy形式(乱流)} \quad m \approx -1/2 \quad (5-b)$$

が得られる。

(3)式の p 及び (5-a)(5-b) 式の m を用いて実験結果を整理すれば図-2に示す通りとなる。図上で点線の交点は、各流れの形態を p 及び m で示した場合の位置を示している。

これによれば、標準砂はDarcy形式、ガラスビーズ及び加圧されたガラスウールは、乱流のDarcy形式、現地Humus層、ガラスウール及びネットはManning形式又はChezy形式に近い流れが生じていることがわかる。

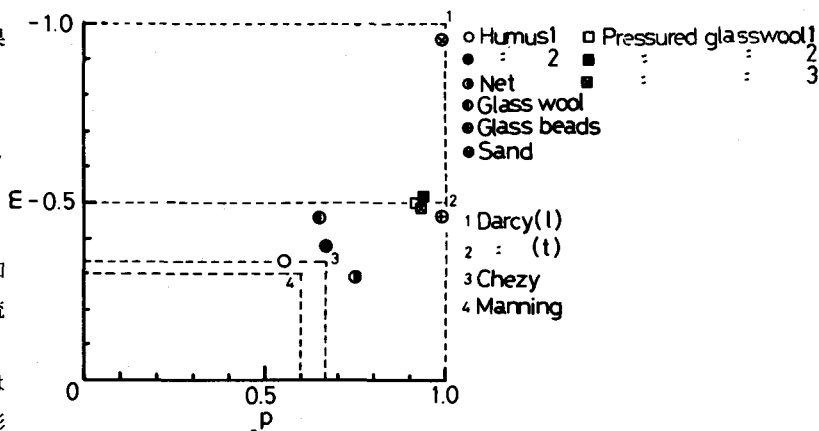


図-2 流れの形態

ここで、 p の値がほぼ1.0である5材料についてレイノルズ数によって検討する。レイノルズ数は、

$$Re = v l / \nu \quad (6)$$

v : 平均流速 l : 流れの代表長 ν : 動粘性係数

で示される。 l を平均空隙径、 ν : $0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ として求めたレイノルズ数は、標準砂で $1.05 \times 10^{-2} \sim 6$ 、 2.0×10^{-2} 、加圧されたガラスウールで $1.00 \times 10^0 \sim 3.85 \times 10^0$ 、ガラスビーズで $3.65 \times 10^1 \sim 1$ 、 0.5×10^2 であった。これらの値より、Darcy流についての限界レイノルズ数1.0を越えるものについては、本実験においても乱流域でのDarcy形式を示していることがわかる。

次に、Darcy形式から逸脱している4材料について、Manning形式、Chezy形式のいずれに近いかを知らため、各式を用いて $h-q$ 関係より k 及び n 、 C の値を求めた。その結果は、表-2に示す通りである。表中、relative ratio (相対比)は次の式のように示される。

$$\text{relative ratio} = (A_{\max} - A_{\min}) / A_{\text{mean}} \quad (7)$$

ここで、 A は各材料における n 又は C の値を示している。 n 、 C ともに、各材料の固有値であり理論的には一定であるから、相対比が小さい値を示す方が適合が良いことを示すこととなる。各材料とも、Chezy式

表-2 Manning 式・Chezy 式
に対する k 及び n , C

		Manning			Chezy		
		K	n	relative ratio	K	C	relative ratio
Humus 1	2°	4.65	2.24		8.71	0.21	
	5°	3.97	2.97		7.13	0.18	
	15°	2.66	2.61		4.73	0.19	
	25°	2.18	2.38		3.79	0.21	
		$\bar{n}=2.60$ 0.224			$\bar{C}=0.20$ 0.152		
Humus 2	2°	4.99	2.72		9.27	0.19	
	3°	3.60	1.94		6.54	0.26	
	5°	2.97	1.81		5.38	0.27	
	10°	2.33	1.71		4.13	0.29	
	15°	2.03	1.66		3.55	0.29	
	25°	1.52	1.31		2.61	0.36	
Net		$\bar{n}=1.86$ 0.759			$\bar{C}=0.28$ 0.607		
	5°	3.38	2.24		6.35	0.21	
	15°	2.45	2.27		4.44	0.21	
	25°	2.56	3.12		4.07	0.19	
Glass 1		$\bar{n}=2.54$ 0.346			$\bar{C}=0.20$ 0.100		
	5°	5.40	4.91		9.46	0.12	
	15°	3.38	3.87		5.74	0.14	
		$\bar{n}=4.39$ 0.237			$\bar{C}=0.13$ 0.154		

値を示している。

4・2 定数 p を支配する要因

定数 p は、(2)式から明らかなように $h-q$ 関係が線形か非線形かを決定する重要なパラメーターである。Manning 形式及び Chezy 形式は、通常地表面又は開水路において用いられる関係である。しかし、4・1で示したように、粗大空隙材料中においても、Manning 形式又は Chezy 形式で整理される流れが生じる。ここでは、粗大空隙材料中の流れに関して p を支配すると考えられる要因について検討を加える。

空隙率 λ と p の値の関係を示したものが図-3である。空隙率の小さいものについては、 $p=1.0$ となり Darcy 則が成立していることがわかる。しかし、空隙率の大きい材料に関しては、 p の値は $0.58 \sim 0.95$ と広い範囲にばらつき、粗大空隙材料に関して p は λ に支配されていないようである。

次に、粗大空隙材料についてのみ単位体積当りの表面積 α (cm^2/cm^3) と p の関係を整理した。その結果は、図-4に示す通りである。これによると、 $\alpha=20 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ 前後を境界に p の値が変化し、 $h-q$ 関係は、 $\alpha < 20$ で非線形、 $\alpha > 20$ で線形に近い関係が示されている。つまり、粗大空隙材料中においては、 α が p を決定する重要な要因となっていると考えられる。そして、ここで注目されるのは、 α の増加によって p が1に近づいても、図-2で示されるように層流状態での Darcy 流は生ぜず乱流域での Darcy 則が成立

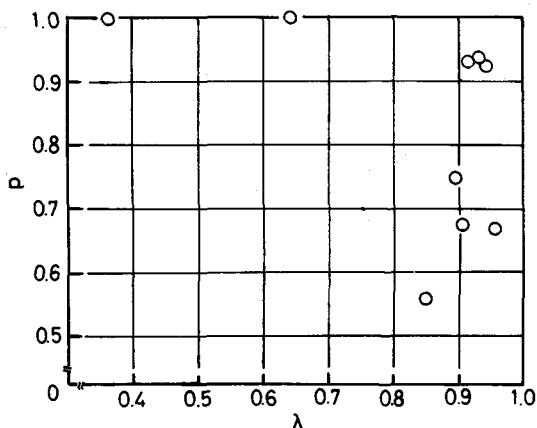


図-3 $\lambda-p$ 関係

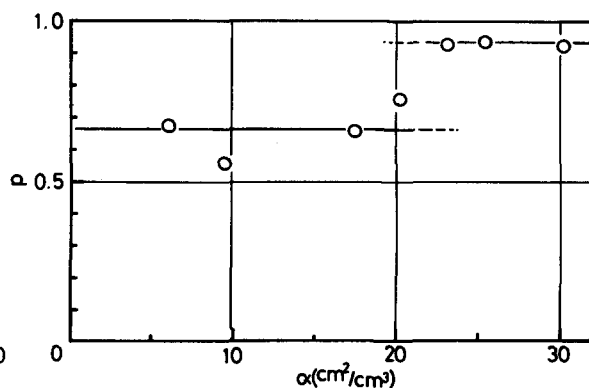


図-4 $\alpha-p$ 関係

に対する相対比の方が Manning 式に対する相対比よりも小さく、Chezy 形式に近い流れが生じていることがわかる。

しかし、地表面流の解析には、Manning 式が用いられるのが一般的であり、 p 及び m の値に関して両者の差は小さく、図-2において各材料の位置は、Manning 則の位置から大きくはずれていないため、実際の斜面流解析にあたっては Manning 式を用いてもさしつかえないと考えられる。そこで、 n の値に着目して見ると、 $1.66 \sim 4.91$ を示しており、高樺・岸本及び PALMER らが得た粗度より 1 オーダー高い

していることである。

5. まとめ

今回、Humus 層のような粗大空隙材料中の水の運動に関して、水路実験を行った結果より以下のことが明らかになった。

- 1) 粗大空隙材料中においては、非線形の $h-q$ 関係が生じた。そして、流れの形態は Manning 形式又は Chezy 形式に近いものであった。
- 2) 実験範囲内において、粗大空隙材料中に生じる Darcy 流は、 k と I は -1 乗の関係とならず乱流域での Darcy 流であった。
- 3) 粗大空隙材料中において、 $h-q$ 関係の線形・非線形を支配する要因は単位体積当りの表面積と考えられ、 $\alpha \approx 2.0$ で p の値が変化した。

今回行った実験は、水深が小さいため水路底面の影響で非線形の $h-q$ 関係が生じたと考えられ、底面の影響を無視しうる高水深では Darcy 則が成立すると思われる。しかし、実際の Humus 層は $5 \sim 10 \text{ cm}$ 厚で今回の実験範囲と変わらないため、斜面流解析には非線形関係を用いるのが妥当と考えられる。

参 考 文 献

- 1) RONALD Z. WHIPKEY SUBSURFACE STORMFLOW FROM FORESTED SLOPES. Int. Assoc. Sci. Hydrology Bull., vol.10 (1965)
- 2) J.P. SONI, NURUL ISLAM and P. BASAK AN EXPERIMENTAL EVALUATION OF NON-DARCIAN FLOW IN POROUS MEDIA Journal of Hydrology, 38 (1978)
- 3) 高棹琢馬・岸本貞夫 雨水流出の実験的研究 京大防災研究所年報第4号 (1964)
- 4) Vernon J. Palmer RETARDANCE COEFFICIENTS FOR LOW FLOW IN CHANNELS LINED WITH VEGETATION A.G.U. vol.27 (1946)
- 5) 杉山博信 斜面雨水流の抵抗則に関する実験的研究 農業土木学会論文集第87号 (1980)