

## 土壌の透水性に関する通則

山 中 金 次 郎

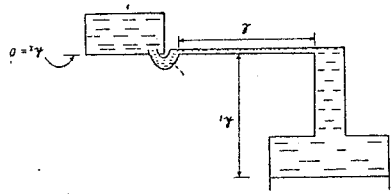
( 農 技 研 化 学 部 )

土壌あるいは毛管組織体の透水性(通気性を含めて)を正確に理解するためには二つの関門を通る事がどうしても必要である。それは共に古典的なポアズイユの法則と之を砂層に適用したダルシーの法則である。前者はどの物理学の教科書にも述べられており、後者は一般土壌学の本に述べられているものであつておよそありふれたものにすぎないまたそれ自体は特に難しいものとは思われない。ところで前者は一本の円筒形の毛細管についての記述に止つておりこれ丈では応用がきかないのである。また後者は原著が様々な方式で引用されており Richards に従へばその引用がしばしば誤つてさえているのである。

従つて之等を土壌の現地の状態に適用するには応用的な橋渡しが必要となるがこの橋渡しは必ずしも容易に行われ難く、従つてこの様な記述は中々見当らないのである。また透水性に関する用語としては土木関係の専門語がしばしば用いられ、その内容規定が必ずしもはつきりしないのであつてこれが農耕関係者の理解に対する熱を殺ぐ事がおびただしいと思われる。アメリカでは最近 Richards が中心となつて委員会を持ち用語の統一と内容の規程を行つたのはこの間の事情がアメリカでも共通的である事を示唆するものであり極めて有意義な企画と考える。以下にこの委員会の結論を加味して応用的な論説を試みる事とする。

### 1) ポアズイユの法則

オ 1 図

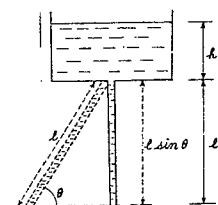


円筒形毛細管を通つて自由に流出する水の速度( $v$ )は圧力落差( $h$ )に比例し長さ( $l$ )に逆比例さらに管の半径( $r$ )の4乗に比例する。すなわち、

$$v = cr^4 h/l \dots\dots\dots(1)$$

オ 1 図において水が半径  $r$  の毛管を  $l$  だけ通過する際に  $h$  に相当するエネルギーの損失が生じた事になる。したがつて一般に  $h$  は水頭損失(loss of head)と呼ばれる。

オ 2 図



オ 2 図において管が直立すると圧力落差は  $h + l$  となり斜になると  $h + l \sin \theta$  となる。

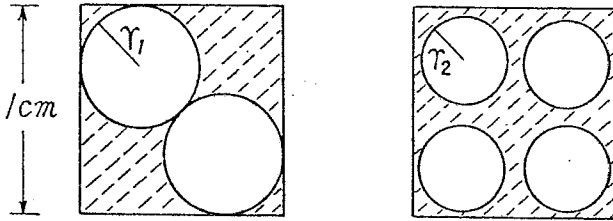
ここまでは容易に理解できるが土壌は一本の管ではなく無数の毛細管の集合であるからこれを実際の場合に應用するため多少の考察を必要とする。

土壌の孔隙量を例へば、50%とし、直立した毛細管の集合と仮定すれば  $1 \text{ cm}^2$  の表面には  $0.5 \text{ cm}^2$  の毛管の開口があり、毛細管の数は  $r$  の2乗に逆比例する。例へば  $r$  が  $0.1 \text{ mm}$  の管は  $r$  が  $1 \text{ mm}$  の管の100倍ある事になる。

才3図において例えば、

- a)  $2\pi r_1^2 = 0.5cm^2, \quad r_1 = 0.282cm$
- b)  $4\pi r_2^2 = 0.5cm^2, \quad r_2 = 0.199cm$

才3図



これ等のおのの毛細管群を通過する水の速度(v)を比較すると、(r<sub>1</sub> = 1, r<sub>2</sub> = 0.1)とし他の条件は同じであるから1式から、

$$v_1 = (r_1)^4 \times 1 \times c = 10^4 r \times c$$

$$v_2 = (r_2)^4 \times 100 \times c = 10^2 r \times c$$

すなわち  $v_1/v_2 = 100$

一般には単位の断面積を通過する水の速力は r<sup>2</sup> に比例する事になる。

従つて(1)式は、

$$v = c \cdot r^2 \cdot h/l \dots\dots\dots(2)$$

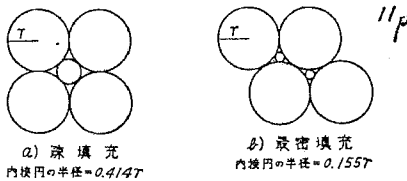
となる。或は単位の毛管断面積に対して

$$v = v/\pi r^2 \dots\dots\dots(3)$$

孔隙量を50%とすれば

$$v = v/\pi r^2 \times 0.5 \dots\dots\dots(4)$$

才4図



- a) 疎填充
- b) 最密填充

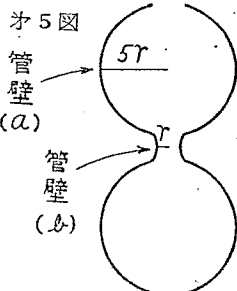
内接円の半径 = 0.414r

内接円の半径 = 0.155r 半径は最大 r、最小 0.414r (約 1/2.5)

である。

最密填充では孔隙の切口はほぼ三角形であつて内接円の半径は 0.155r である。

毛管の数は前者は 4r<sup>2</sup> について1個、後者では 2/3 r<sup>2</sup> に対して2個である。



今図のような毛管を水が飽和して下方へ流れる場合を考えると、最大の切口を (5r) 有する管壁(a)の1cm当りの抵抗は最少の切口(r)を有する管壁(b)の1cm当りの抵抗に対して1式より、

$$1 : 5^4 = 1 : 625$$

別の表現を用いると(b)の水頭損失(h<sub>1</sub>)は(a)の水頭損失(h<sub>2</sub>)の625倍になる。したがつて水は孔隙の狭部によつて制約され他の部分は殆んど関係しない事になる。

土壤の毛管組織は立体的であり管の形、大きさが変化するため(2)式のままでは実際の場合の考察に適さない。

土壤粒子がほぼ同じ大きさで均質に填充された場合の垂直下方への水の流動を考えるのが才一歩であろう。周知の如く疎填充の孔隙の切口はほぼ4辺形であり、内接円の

Terzaghi はこの考えから土壌の透水的な孔隙組織を篩を重ねたセットに類推して透水係数算出の理論式を提示している。土壌の沈圧、床締めなどの効果は孔隙量そのものの低下よりむしろ孔隙間のくびれの狭化に帰すべきであろう。土壌の風化、生成過程を通じて表層からの溶脱物質は下層で<sup>2</sup>通過され狭部に沈積してこの部分を閉塞するように作用する。

水田の湛水状態ではこのたうな過程は極めてじん速に行われ特に、鉄の沈積は比較的短期間に不透水層に近い緻密層を生成するのである。富士東麓の畑地で自然生成的にできた不透水の盤層(マサ)の実験に依れば、この層の孔隙量は完全に透水する表層と同程度であり、時にさらに大きな孔隙量を有する。従つてこの場合沈積物が狭部を閉塞的に作用し、かつこの沈積物は極めて緻密である事を示している。したがつて残積的に風化生成した土層の下層はその粒径、孔隙量などに比してかなり不透水的であるが新期の崩積性堆積物では粘土層でもかなり透水的である。磐田ヶ原の洪積台地において残積的な台地面では極めて不透水であるが、台地間の凹谷における台地の母材の崩積層では全く透水的であつた。ただし以上の引例の透水性の現地測定は後に紹介する注入式の透水通気試験器によつて行われたものである。

2) ダルシーの法則

ダルシーは砂層の透水速度について(1)式が成立する事を示した。

$$V = K \cdot h / \ell \dots\dots\dots(5)$$

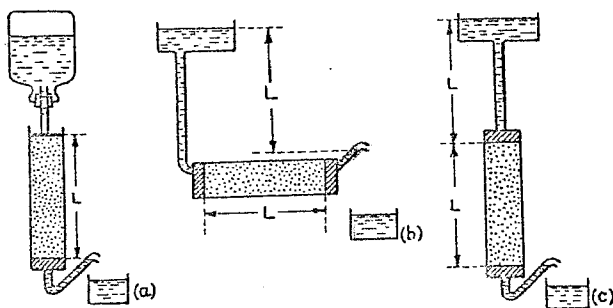
Kは砂層の物理的条件によつて定まる定数で透水係数と呼ばれる。hはオ一式と同意義であり、 $\ell$ は砂層の厚さである。h/ $\ell$ は砂層1cm当りの圧力落差或は水頭損失であつて動水勾配と呼ばれる。砂層の状態が同一であれば流動速度Vはh/ $\ell$ に比例する。

この関係はTerzaghiが粘土層でも成立する事を実験し、さらに畑地的な不飽和浸透でも成立する事がRichards Childsなどで提示された。

したがつてこの法則を理解する事によつてすべての浸透の場合を考察、判定する基礎が得られる事にもなる。

ダルシーが原著で提示した引例はオ1図(a)(b)(c)である。ここに問題になるのは毛管内の水の流動を生ずる動力の性質であつて多少理解し難い内容を含んでいる。

オ6図



Darcyの原図(オ6図)において(a)図では砂層の上の湛水はマリOTTびんにより零に近い浅層に保たれる。したがつて砂層の上端の圧力は零であり下端は自由に外気に開いているから同じく零である。したがつて圧力零、圧力差零で水が流動する事になる。

今下端をレベルにとれば水位管(ピエゾメーター)の水位は上端でL、下端で零である。

従つてこの場合の水頭落差或は単に水頭(Hydraulic head)はLであつて之が水の流動を起生する原動力であり、砂層1cm当りの水頭はL/L = 1である。

水頭はすなわち重力落差であるから毛管中の水の流動は専ら重力によつてゐる事は明らかである。水頭  $L$  は同時に砂層の厚さに相当するから  $h/\ell$  は砂層の厚さに無関係に常に  $L/L$  であつて常に 1 である。(b) 図では水平の砂層を通過する水の流動は水圧  $L$  を原動力とし重力の作用を受けない。

毛管の左端の圧力は  $L$  であり右端は外気に開いているから零である。すなわち圧力差  $L$  が水の流動の原動力であり  $h/\ell = L/L = 1$  であるから  $V$  は (a) と等しい。この場合は砂層の長さが長くなると  $V$  は反比例して減ずる。この点が (a) と区別される。

(c) 図では水頭が  $2L$  であり、又上端の水頭は圧力  $L$  によるものであり、下端の圧力は零であるから  $2L = L$  (水頭) +  $L$  (圧力差) と見る事ができ、流速は (a) および (b) の 2 倍となる。また (b) では水圧  $L$  は左端における水位 (水頭) とも見られるからダルシーの式の  $h$  は水頭 (hydraulic head) を意味するものであつて圧力差だけで定めるものでない事が論結する。

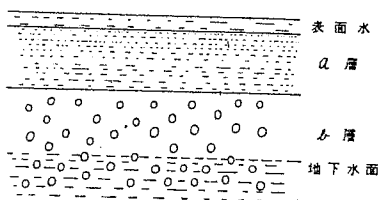
Richards は農業の一般目的に対して動力源としての重力の重要性を強調している。

### 3) 土壤内部への浸潤

以上に述べた引例は均質な粉質体を飽和的に透過して自由に外気に流出する場合であつてこのような場合は実際の圃場では稀である。

例えば水田で表層 (a) が土層で下層 (b) が礫層であつて、地下水面が (b) 層の下部にある場合はこの場合に当る。

オ7図

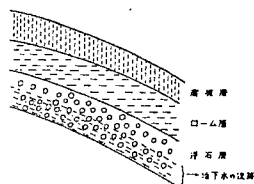


こゝでは表面水は (a) を飽和して (b) 層に流下し、(b) 層中を速かに自由に流れて地下水面に注ぐのであるから (1) 式あるいは (2) 式が適用され表面水の深さが透水量に支配的に影響する。ただしこの場合 (b) 層中の空隙の圧力を外気 (一気圧) と考えられるが、地下水が上昇すると加圧されて透水を減じ低下すると減圧されて表面水を引き込む事になる。

### 4) 透水係数 K の測定

土壤はその状態で一定の孔隙組織を持つており、それは透水組織或は通気組織とも考える事ができる。透水係数はこの孔隙組織をある条件下で測定表示したにすぎないから測定が正しく行われたとしてもこれは自然状態の透水態を正しく表示しているとは限らない。一例として考えられるのは水中に沈積した粘土層では平板状の粘土粒子が沈下の際の Orientation によつて層状に堆積するから透水能は方向によつて著しく異なるであろうし、またもし弱度であつても柱状の構造化の傾向があればその方向に流動し易いと考えられる。これらの考えは今迄に述べたように水の流動は極度にデリケートにより大きい孔隙を選んで行われると云う原理から導かれるものであろう。

オ8図



オ9図



構造の中、特に下層土の杭状、塊状などの構造はその分布が不規則であるから小さい採取ブロックで代表させる事はおそらく不適當である。火山性の台地土壤では構造的には均質であつて下層はほぼ massive (均質連結状) な構造を持っているがこのローム層はさらに基層となつてゐる洪積層の波状の侵蝕地形に平行に蔽つているためにこの傾斜が透水の大きな動力源となつてゐる。特に鹿沼土のような火山礫は自由に水が透過できるため透水の自由流路を提供し(オ8図)、凹地では湧水して一時的な湿地状態をなすのである。(オ9図)

この現象は洪積層或は崩積地中の礫層でもよく觀察される。したがつて何らかの方法で測られた透水係数はさらに地形的の見地から考察しないと實際的でない。約言すれば透水係数は大きいけれども實際の水の流動は早くない場合、およびその逆の場合ができる。また層の厚さについても問題が残る。表面に薄いクラストができて透水量が $\frac{1}{10}$ 以下となる事がある。透水係数は $l = 1 \text{ cm}$ 当りの数値であるからもしこの層を $1 \text{ mm}$ とすれば、

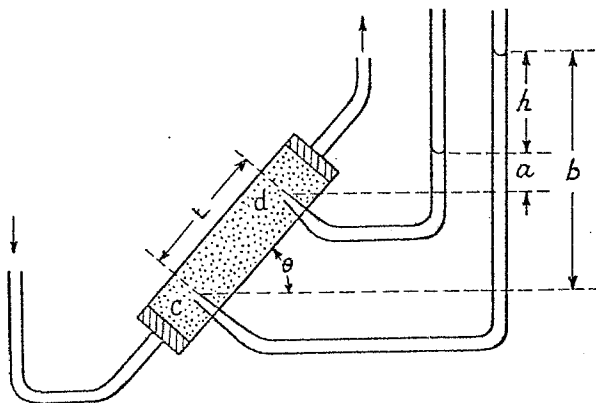
$$V = K \cdot h \cdot \times 10$$

となる。もしこの層の下の $K$ が $\frac{1}{100}$ とすればこの $1 \text{ mm}$ の層は下層の $10 \text{ cm}$ に相当し、もし $\frac{1}{10,000}$ とすれば $10 \text{ m}$ の厚さに相当する。

緻密な粘土のフィルムの場合では恐らくこのような状態がおこる事が可能であろう。

さらに一般的な場合に対する考察として Richards の優れた引例を紹介する。(オ10図)

オ10図



この例では管が $\theta$ だけ傾斜し水は下方から押し入れられて上方に流動するため、圧力差と重力落差は反対の符号を持つ事になる。

重力による動力、

$$A = -L \sin \theta \times 9g/L$$

圧力差による動力、

$$B = (b-a)/L \times 9g$$

$$= (h/L + \sin \theta) 9g$$

$$A+B = h/L \times 9g$$

この場合においても $V = h/l$ が成

立する事がわかる。ただし $h$ の定め方に注意を要する事が示されている。この引例により、Richard に水平方向の水の流動の場合以外、一般の現実の農業場面に對して圧力差だけを考へて重力効果を無視する事が不合理である事を警告しているのである。

かくて土壤の透水係数 $K$ を知るには流速の外に動水勾配を知る事が必要であり、このためには土壤の各部位の水圧を測定する事が必要であるが、現実の圃場でこれを確めるには色々な困難を伴う。

山崎は最近湛水下の水田の各部位の水圧を測定する新しい優れた方法を提案しているが、土層の構成が複雑であつて水の流動方向が一様でない場合などには尚色々な困難を伴うのではないかと考へる。

尚、アメリカ土壤学会の透水性 (Permeability and Infiltration) に関する分科会 (1951) において用語とその内容について新しい規定を行つたが、その報告 (Richards: Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol. 16, 1952) から特に Darcy の法則に関する部分を紹介しておく。

1. Darcy の法則

a) 古典的規定

砂層を垂直下方に透過する水の速度は動水勾配に比例する。即ち  $V = K \cdot h / \ell$

b) すべての方向への拡張

均質の多孔質体中の水の流動速度は任意の流動方向についての動水勾配に比例する。Darcy の一般式として  $V = Ki$

2. Hydraulic head : 水頭

土壌中のある地点に連結された水位管(或はマンメーター)によつて示される水の基準レベルに対する上昇高。

3. Hydraulic Gradient : 動水勾配

土壌柱における水頭の減少割合、2点間について  $h_1 - h_2 / \ell$ 、水頭の最大減少割合と有する方向にとる。

4. Hydraulic Conductivity : 動水伝導度

流動に対する動力と流速との割合、Darcy の透水係数  $K$  に相当する。

5. Flow Velocity : 流速或は流速

Darcy の式の  $V$  に相当する。

6. Green の理論及び注入法による透水性の測定

畑状態の土壌内部に雨水或は灌漑水が滲透してゆく場合はずつと関係が複雑になる。表面水深 ( $h$ ) を一定とし水が飽和層として前進する最つとも簡単な場合はついても、 $\ell$  が絶えず増加して変化するため前進速度は次第に割合を減じつつ減少し、 $K$  を求める事が困難になる。

Green および Ampt はこの場合について研究を行つた。

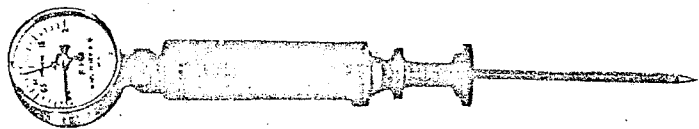
土層表面の水深を  $h$  とし、 $t$  時間後飽和層が  $\ell$  迄前進したとすれば全体の落差或は水の前進の動力は  $(h + \ell + p)$  となる。ただし  $P$  は水の前進を促す毛管力である。飽和層の前進速度  $d\ell / dt$  は次式で与えられる。

$$d\ell / dt = \frac{K}{S} \left( \frac{h + \ell + P}{\ell} \right) \dots \dots \dots (6)$$

速度は始め ( $\ell = 0$ ) 無限大であり  $\ell$  の増加に従つて双曲線的に減ずる。ただし  $S$  は孔隙量 (%) である。序論で述べたように土層合体の透水性を判定するには自然状態の異なる各土層毎に透水性を測定する事が必要である。

この目的のために著者等によつて考案されたのがオ 1 1 図の様な測定器であつてその原理は前の Green の式に立脚するものである。

オ 1 1 図



測定は管針の先端の 4 個の小孔からかなり速い器一定の速度で (  $400 / \text{sec}$  ) で一定量の水 (  $2000$  ) \*

畑状態の土層中に注入し、その際の暑定常な抵抗値を圧力計で読みとるのである。

また抵抗が大きい場合には圧力計の読みを適当な値に保つ様に注入し、その時間をストップウオッチで計り前のスケールに換算する方が安定な値が得られる。小孔から速い速度で押し出された水は周辺の土壤毛细管の強い抵抗に会つて大きな孔隙を選んで前進するために小孔の方向性は最初の1秒以内に消去され、小孔を中心として球に近い形状で前進し且、飽和に近い状態が保たれる事が均質な土壤で実験された。

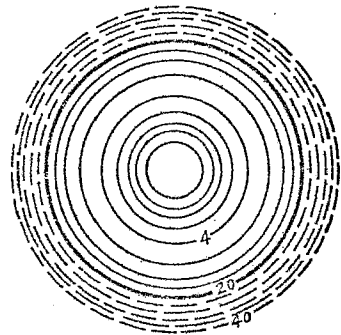
Greenの式のP(毛管力)はこの速い流動に対して暑消去され得るものとする。ただし非常に土壤が乾燥している場合はその影響を考慮する必要がある。

この測定の理想的な場合を仮定すると一定の注入速度(20cc/5cc)に対して水の球面の前進速度は急に遅滞し同時に球の半径に相当する $\ell$ の変化はGreenの場合より非常に小さいものとなる。才1表及び才12図

才1表

注入開始後の時間(秒)	球の容積(孔隙量50%) (cc)	$\ell$ (=球の半径) (cm)
	0.2	0.363
	0.5	0.493
	1	0.620
	2	0.782
	4	0.986
1	8	1.231
	12	1.421
2	16	1.563
	20	1.684
3	24	1.789
	28	1.884
4	32	1.969
	36	2.050
5	40	2.121

才12図



この遅滞した水面の前進のために、その前面の土壤孔隙の空気の圧力は大気圧と考えて差しつかえない。したがつて $\ell$ の両端の圧力差は管針の小孔内の圧力すなわち圧力計の読み(h)に等しい。

Greenの式は一定の注入速度Vに対して次の様に表現される。

$$V = \frac{K}{S} \frac{h + \ell}{\ell} \dots\dots\dots(7)$$

Vは前進する球の表面から外部に流出する水量である。圧力差には正常な測定では0.05~2気圧、水柱の高さにして50cm~20mであつて $\ell$ に比して遙かに大きく $h + \ell \approx h$ となる。

したがつて

$$V = K/S \cdot h/\ell \dots\dots\dots(8)$$

Vを一定に保つには、 $\ell$ の増加に比例してhは理論上高まるが実際の測定では $\ell$ の前進速度は最初の1秒を除いて甚だ小さいために暑一定の圧力計の読みが現実に得られる。

hの逆数の10倍を便宜上透水度(Index of Permeability)とし透水性の大きさの目安と

する事ができる。ただしこの値 ( $h$  或は  $10/h$ ) は計測範囲を通じて必ずしも定比例的な関係が保たれない。

結論として  $h$  を大きく保つて注入速度を短かくした方が、その反対の場合より大きな透水度を得られる傾向にあるがこれは後者の方が気泡の残留が少なく、飽和滲透に近い状態になる事と、これによつて  $\ell$  が少くなる事が考えられる。いずれにしてもこの簡単な手動式の計測器による値の不安定は免れないが計測が数秒しか要さないために多数の実験が可能になる事により優に相殺され得る。これは自然状態の土壤の不均一性を考慮した場合特に然るものと考ええる。

#### 6) 透水度と透水係数との関係

注入法の原理が一点を中心としてこれが球状に前進する場合の抵抗、すなわち水頭損失の計測に存するだけに一般の層状の水の前進の場合に対照するには多少の難点が存し、注入法の理想的な測定を仮定しても、精密な透水係数の計算は現実的な意味のない事が明らかである。

このような観点から若干の考察を行つて見よう。水が球状に前進する際、才 12 図のような注入後の毎秒毎の球面を想定できる。内側の実線は水だけの  $\ell$  の前進図であり外側の破線は土壤の孔隙量が 50%、或は [孔隙量+残留水分] が 50% であつて水球の容積が水丈の場合の 2 倍として拡大する場合の半径  $\ell$  の前進を示すものである。この図でわかるように精密には、土壤の孔隙量および含水量が、換言すれば空隙量 (%) が  $\ell$  に関係したがつて圧力の強さ  $h$  に関係するのである。実際にはおのおの断面毎につき現地容積重を測定して空隙量を算出しこれによつて  $\ell$  を推算する事になる。

後者の場合、20cc/5cc で注入された水球は 4 秒後には半径  $\ell = 1.97 \text{ cm}$  となり、この球の表面積は  $48.72 \text{ cm}^2$  となる。この表面を通過して毎秒 4cc の水が外に流出するわけであるから、球の表面の単位の表面積から一時間に流出する水量は  $4/48.72 = 0.082 \text{ cc}$  となる。

この一時間 (4→5 秒) に  $\ell$  は  $2.12 - 1.97 = 0.15 \text{ cm}$  だけ前進するが  $\ell$  の変化はこの期間特に少ないからこの場合 32cc の球と 40cc の球との  $\ell$  の平均値をとつてさしつかえない。

単位の球表面から実際に流れ出す毛細管の断面積は孔隙量に等しい。火山灰土壤の場合を例にとつて 80% (0.8) とすれば透水係数  $K$  は次の様に算定できる。

才 8 式から

$$V = K/S \cdot h/\ell$$

$$K = V\ell S/h = 0.01533/h$$

ただしこの場合の  $V$  は単位の断面積を単位時間に流出する水量である。

圧力計の読み  $h$  との関係は

$$0.1 \text{ 気圧} \quad 1.6 \times 10^{-3}$$

$$1.0 \text{ 気圧} \quad 1.6 \times 10^{-4}$$

以上はおおよそ値であるが、著者等の考案した現地用の透水円筒による結果から算出された透水係数とは特に土層が均質であつて、かつ円筒の末端から水がかなり自由に流出し得る条件下においてよい一致が見られた。

いずれにしても、自然生成的な土壤断面の透水性はそのまゝの案で、別に研究さるべきであり、注入式の測定器はその一つの有力な武器である事がこの土壤調査を通じて確認されたと考えられる。これの測定値は Darcy 的に測定された透水係数とは別にそれ自体としての価値があり両者を比較する場合には前者



の値の内容が複雑しているために、土壌の孔隙量及び含水量、さらに現実の空気間隙量などを考慮する  
事が必要である。

文 献

- (1) 山崎不二夫：水田の降下浸透量の新しい測定法。農業土木研究Vol. 27, No. 6, (1959)
- (2) Richards L.A.: Concerning permeability units for soil.  
Soil. Sci. Soc. Am. Pro., Vol. 5. (1940)
- (3) Darcy, Henry: Les fontaines publique de la ville de Dijon.  
Paris: Dalmont. (1856)
- (4) Terzaghi : Principles of soil mechaucics:  
III Determination of permcability of clay.  
Engineering news-record, Vol. 95, No. 21, (1925)
- (5) Green, W. H & Ampt, G. A. ;  
"Studies on soil physics, (part II).  
the permeability of an ideal soil to air and  
water"  
J. Agre. Sci, 5PP. 1~29, (1912)