

## 定常法による不飽和透水係数測定法の 問題点とその改善

岩間 秀矩\*\*・小川 和夫\*

Limitation of Steady State Methods  
for Measuring Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils

Hidenori IWAMA, Kazuo OGAWA  
Hokkaido National Agricultural Experiment Station

The hydraulic conductivity of unsaturated soils was measured in applying steady state method with a suction type equipment. In this equipment, to apply the suction and hydraulic head gradient at both ends of the soil column, it is necessary to lower the level of the tank supplying water and the drain point from the position of the soil column.

The measurement with this equipment are more stable than those with pressure type equipment and the cost is lower.

Limitation in the use of this equipment involve the hydraulic contact and connection between soil and filter. The first problem arises when there is poor contact between soil and filter due to the existence of a small contact area, defective connections and unevenness. The second problem arises when the flow rates in the soil column restricted by the permeability of the filter in the case of highly permeable soils with high moisture content. As a result, permeability of filters under unsaturated conditions is lower than that under saturated conditions, because hydraulic connections between filter and soil are less satisfactory under unsaturated conditions.

The measurement of the suction profile in the soil column is necessary to identify these problems and enable to carry out steady state measurement. Several methods whereby fine sand, filter paper and other materials promote contact between soil and filter can be applied to alleviate these shortcomings.

### 1. はじめに

土壌中の水分移動を定量的に把握するためには不飽和透水係数の測定が不可欠とされている<sup>1)</sup>。不飽和透水係数の測定はフィルードあるいは室内において、さまざまな方法により行われているが、大きくは土壌中における水の流れを定常状態にして透水係数を求める定常法と、排水あるいは浸潤過程における水分移動の解析から透水係数を求める非定常法に大別される。これらの測定原理等については Klute<sup>4)</sup>、中野<sup>5)</sup>により解説されている。

わが国においては岩田<sup>2)</sup>が室内法として Richards の加

圧型透水装置（定常法）を用いて以後、加圧定常法<sup>3)</sup>が一般的となっている。

定常法の利点は測定原理に非定常法におけるような仮定が殆んど含まれず、ダルシー則の成立を条件とするのみであり、再現性も高く信頼性が高いこと<sup>3)</sup>、および、水分移動の理論的検討<sup>1)</sup>に適していることであると思われる。

しかし、上記法による不飽和透水係数の測定例および測定法の検討例<sup>3)</sup>は未だ数少なく、測定を正確に行う上で必要な諸条件について、十分に明らかにされていないものと思われる。著者らは定常法において、試料内の流

\*北海道農業試験場農芸化学部重粘研究室

\*\*現熱帯農業研究センター

\*\*\*不飽和透水係数測定方法の呼称法は種々あるが、ここでは中野<sup>5)</sup>による方法に準じる。

れの様相を把握することが、正確な測定を行う上で必要であるという認識を得、また、水位差による吸引定常法による測定を試み、いくつかの利点を認めたので報告する。

## 2. 測定方法

主として、水位差による吸引定常法により測定を行った。その装置の概要と測定原理は図-1に示すように、土壌試料の上下端にメンブランフィルターを介して吸引圧を作用させ、それにより土壌の水分調節（即ち、不飽和状態の調節）を行うと同時に、上下端に適度の水位差を与え、垂直方向に定常流を生じさせるものである。土壌試料の上端面および下端面に作用する吸引圧は、それぞれ給水用マリョットタンクおよび排水口との水位差によって与えられ、その調節はフィルター部と給・排水部をつなぐ肉厚ビニールチューブを1~1.5 mと長くし、マリョットタンクおよび排水口の位置を試料より下げることによって行なわれる。また、測定は常に吸引圧を増大させる方向で行う。この方法による透水係数は次式により求められる。

$$\text{透水係数 } K = Q / (A \cdot G \cdot T)$$

ここで  $Q$  : 流量  $ml$

$A$  : 試料断面積  $cm^2$

$T$  : 時間  $sec$  又は  $day$

$G$  : 試料内動水勾配  $cm/cm$

$G$ は試料内の二ヶ所に埋設されたテンシオメーターの測定値から次式により求める。

$$G = \{ -P_b - \Delta C - d - (-P_a - \Delta C) \} / (-d)$$

ここで得られた透水係数は近似的に平均吸引圧  $-P_{ab} = (P_a + P_b) / 2 - \Delta C$   $H_2Ocm$  に対応する。(記号は

図-1 参照)

試料円筒は内径、8または10cm、高さ4cmのステンレス製を用いた。円筒には上下端よりそれぞれ1cmの位置に、ポラスカップ挿入用の小孔が2ヶ所あけてあるが、吸引法においては加圧法に用いられる試料円筒のような側面の多数の小孔は必要としない。

メンブランフィルターは孔径0.8~1 $\mu$ のものを用いたが、吸引圧が-100cmを越えると気泡の浸入がみられた。その透水能は飽水状態で、かつ約5cmの水位差において2~3 $\times 10^{-3}cm/sec$ である。

加圧定常法では図-1の土壌試料~フィルター部分が気密なチャンパー内に格納され、加圧することにより試料の水分調節を行うものであるが、その測定法等については岩田<sup>3)</sup>により解説されている。

## 3. 結果および考察

### 1) 定常化に要する時間

図-2に鈹質畑表土について測定した一例を示したが、土壌の透水性が大きいほど流量および吸引圧の定常化が早く達成される傾向があり、 $1 \times 10^{-7}$ の透水性においても40時間前後と比較的早く定常化することが認められる。しかし、ち密な重粘土においては図-3に示すように、流量の定常化は比較的早い吸引圧の定常化がかなり遅れることがしばしば認められる。これは、ち密な土壌の特性に起因すると同時に、ポラスカップと土壌水の平衡化の遅れも関与してくるものと考えられる。また、図-3 bにみられるように、不成功に終わった測定においても、流量は定常化しているのに対し、吸引圧分布は数日以上にわたり変動していることが認められる。これらのことは、定常化の確認には流量と同時に吸引圧

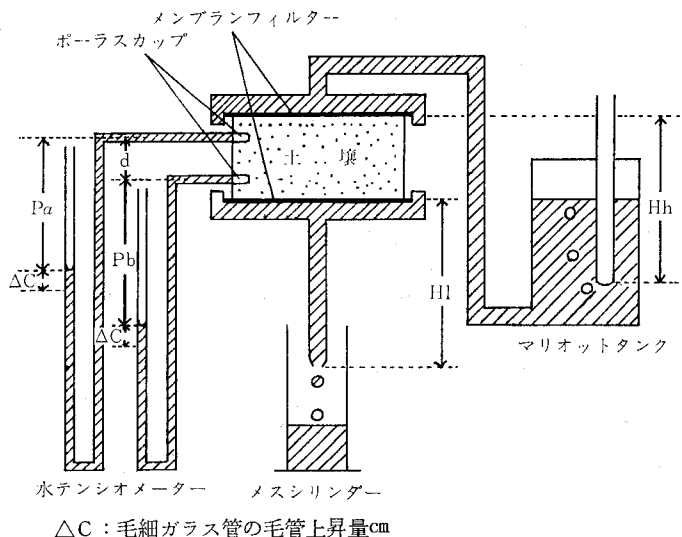


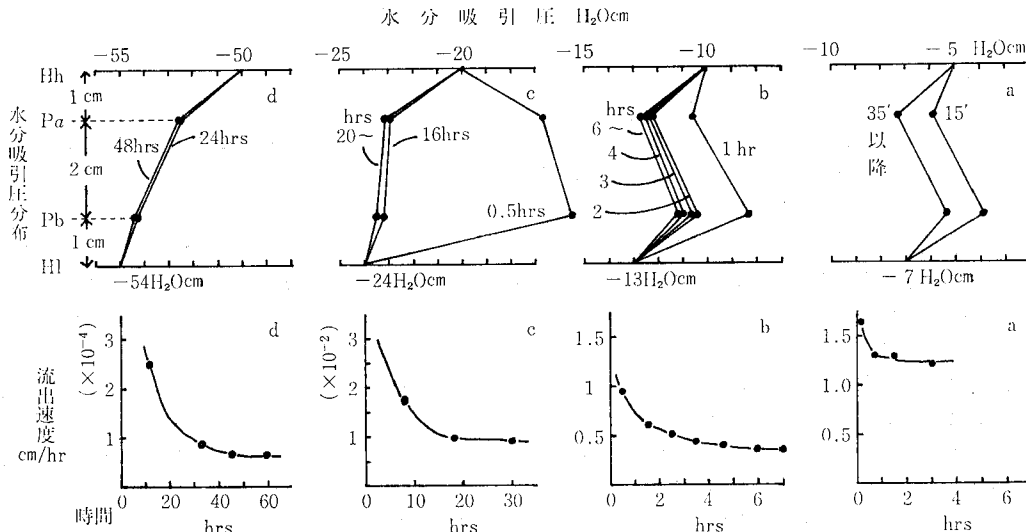
図-1 測定装置概略図

分布にも注意を払う必要のあることを示している。

2) 土壌・フィルター接触部の透水性について

定常法による不飽和透水係数の測定が不成功に終る原因は種々あるが、土壌試料内の水の流れに関連した要因

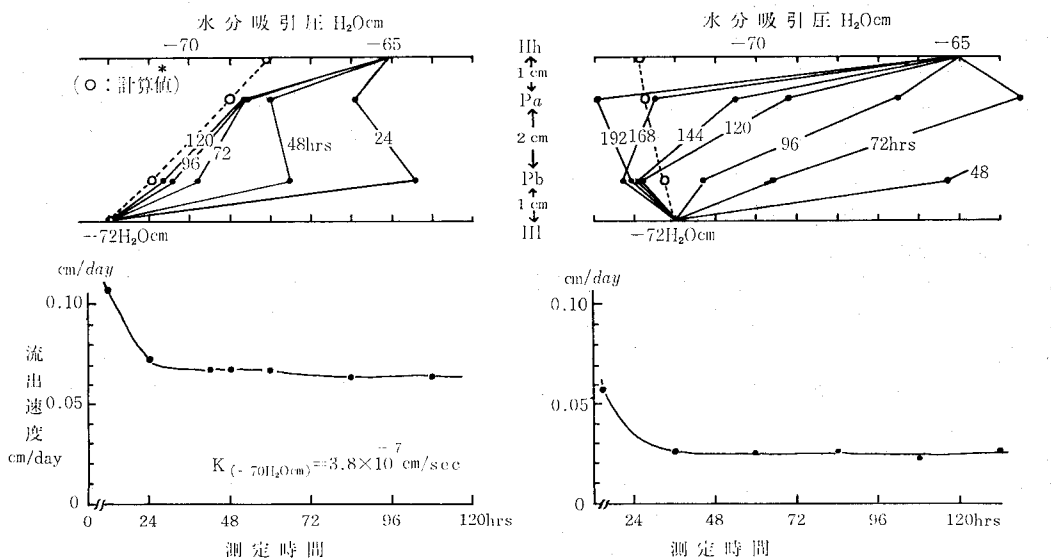
に限定してみれば、フィルターを間に介した給排水部と土壌間の流れの連結性の問題に集約される。即ち、土壌とフィルター接触部の問題であり、それには主として2つの問題が認められる。一つは土壌とフィルター間の接



定常状態における

流出速度	$Q = 6 \times 10^{-4} \text{ cm/hr}$	$Q = 0.01 \text{ cm/hr}$	$Q = 0.375 \text{ cm/hr}$	$Q = 2.4 \text{ cm/hr}$
動水勾配	$G = 1.7 \text{ cm/cm}$	$G = 1.25 \text{ cm/cm}$	$G = 0.2 \text{ cm/cm}$	$G = 0 \text{ cm/cm}$
平均吸引圧	$P_{ab} = -53.6 \text{ H}_2\text{Ocm}$	$P_{ab} = -23.3 \text{ H}_2\text{Ocm}$	$P_{ab} = -12.0 \text{ H}_2\text{Ocm}$	$P_{ab} = -6.3 \text{ H}_2\text{Ocm}$
透水係数	$K = 1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$	$K = 2.2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$	$K = 5.2 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$	$K = \text{計算不能}$

図-2 吸引定常法による不飽和透水性測定例1。(雄武褐色森林土, 畑表土)



a. 土壌～フィルターの接触性良

b. 土壌～フィルターの接触性不良(接触部の偏り)

\*註)  $\int dz = \int \frac{dh}{-(q/K-1)}$  式において、流量qに実測値を入れ、下端(HI)を出発点として求めた吸引圧分布

図-3 吸引定常法による不飽和透水性測定例2。(雄武酸性褐色森林土BC層)

触面の偏り、あるいは密着度の不足等、接触性の不良に起因するもので、流量の低下や試料内における流れの偏りを生じる。図-3 bに示した事例は測定終了後の観察によれば、接触面の偏りによって測定不能となった一例であるが、流量が成功例に較べて少なく、吸引圧分布は数日以上経過しても安定せず、最終的には動水勾配が0に近づくことが認められる。一方、測定成功例(図-3 c)においても、上端部の動水勾配は土壌内部のそれより大きくなっている。その理由として土壌～フィルター部の接触が完全ではなく、そこにおいて水の流れに対する抵抗が増大していることが推定される。

これは、土壌端面とフィルターの接触が全体として均一であって、動水勾配が水テンシオメーターの測定誤差以下とならない程度の流量が確保されるなら、測定可能であることを示している。水テンシオメーターの温度変動は比較的大きいことを考慮すれば、動水勾配は0.2以上の値が必要といえる。図-3におけるように接触性不良は土壌試料の上端面で生じることが比較的多いが、必ずしもそこに限定されるものではない。また、接触不良は図-3 bのように接触面の偏りを生じることが多い。

二つめの問題はフィルター自体あるいは土壌との連絡性に制限されるフィルター部の透水能が土壌の透水性より相対的に低下することで、膨軟な土壌や砂の透水性を高分域において測定しようとする際に多く生じる問題である。この事例は図-2 aに示したが、これは図-2 b～dに示すように吸引圧を増大させ、土壌の透水性が低下すれば良好な測定が可能となっており、上述したような接触性不良がその主因でないことは明らかである。フィルターを介した透水性の測定において、フィルター自体の透水能が測定の上限であることは言うまでもなく、透水性の高い土壌に対しては高い透水能を持つフィルターを使用する必要がある。しかし、不飽和状態においては、さらに、土壌の不飽和度(空気率)によりフィルター面と土壌水との連絡性が減少し、フィルター部透水能の有効度が低下してくることが予想される。豊浦標準砂について定常法による透水性の測定を試みた結果では、吸引圧-3～-50cmの間では動水勾配がいつでも殆んど0となり測定不能であり吸引圧-50cm以下になって漸く測定可能となった。そして測定不能時における流量は1.1cm/hr(-5H<sub>2</sub>Ocm)から0.015cm/hr(-40H<sub>2</sub>Ocm)まで減少していた。これは上記の予想を裏付けるものといえよう。すなわち(フィルターの透水能)×(不飽和度)×(接触性)で現わされるフィルター、土壌接触部の透水能が土壌の透水性のオーダーにはほぼ匹敵する状態になって、はじめて定常法による不飽和透水性の測定が可能になるといえる。したがって粗粒な砂等について高分域における透水性を測定することは、この方法では

かなり困難であることが理解される。

以上述べてきたように、測定中における土壌内の水の流れの様相は、吸引圧分布とその経時変化の測定により適確に把握することが可能であり、同時に正確な測定を行うために不可欠であると考えられる。

### 3) 土壌～フィルター間の接触性の改善処理

土壌フィルター間の接触性を改善するためには、下記の処理が有効であることが多い。

a, 試料端面の整形を充分に行ない、凹部を細砂クラクション(0.2mm以下)以下の砂質土などを用いて充填均平化する。

b, 土壌、フィルター間に、試料円筒の径より僅かに小さい口紙をはさみ、接触性の改善、吸引圧増大に伴う土壌の収縮への対応、およびフィルター面を根端や砂角から保護すること。

c, 給水フィルター部の上に適当な重りをのせ、密着性を良くすること。

しかし、これらの処理は高水分状態において高い透水性が問題となる場合には、土壌、フィルター接触部の透水能の相対的低下をもたらす場合もありうる。

他方、土壌、フィルター接触部の透水能を増大させるためにはa～cによる接触性の改善と共に透水能がより大きいフィルターの使用が考えられる。しかし、この場合にはフィルターの孔径が大きくなるため、気泡の浸入する吸引圧が低くなるので低吸引圧域および中～高吸引圧域の測定を別個に行う必要がある。

不飽和状態では水分含量の低下に伴い急速に透水性が低下することが多く、測定流量が著しく少なくなるが、こうした場合には給・排水部の水位差を拡大して動水勾配を高め、流量の増大をはかることが有効である。

### 4) 水位差による吸引定常法による不飽和透水係数測定法の利点

a, 定加圧装置およびチャンパーが不要であり、安価に連数が揃えられること。および、長期にわたる測定期間中に停電等による攪乱を受けないこと。

b, 一般に使用されている水銀圧力調節装置の調圧限界は数mm Hg(10H<sub>2</sub>Ocm以上)以上であるので、それ以下の低圧状態の測定が出来ないが、吸引法では可能である。

c, 土壌・フィルター間の接触性が加圧法より安定する。これは著者らの経験によれば、加圧法において圧力を25mm Hg以上にした際に、上部のフィルターと土壌間の接触性が急減することがしばしば生じた。これらの理由については不明な点が多いが、吸引法では土壌の上下端に負圧をかけることが、接触性を良好にする上でプラスに作用するのに対し、加圧することは、とくに、上部の土壌・フィルター接触部の水の連絡性に余りプラスに

作用しないことが関連していると思われる。

水位差による吸引法の問題点としては、これまでに述べてきた定常法の問題点が全て該当するが、さらに、室内においては水位差が物理的に150cm程度に限定されることがある。

#### 4. ま と め

定常法による不飽和透水係数測定法の2・3の問題点と改善法について検討した。得られた結果は次のようにまとめられる。

1) 土壌試料の上下端面と給・排水部につながるフィルター面との接触部が、流量の制限因子となって、透水係数の測定不能をもたらす原因として二種類の問題がある。

2) その第一は、土壌・フィルター間の接触面積割合、密着性および均一性等の不良に基づく流量の減少によるもので、端面の均平化、口紙、細砂等の介在による密着性の強化が、その改善に有効である。

3) 第二には測定可能な透水性の上限を規制するもので、主として、膨軟な土壌あるいは砂の高水分域における透水性を測定する際に問題となる。この場合には、フィルターの最大透水能(飽水時)が上限となるのは当然であるが、不飽和な土壌と接触した場合にはその空気率および接触性により、透水能の有効割合が低下する。従って、測定の上限となる透水係数値はフィルターの材質のみならず供試した土壌によってそれぞれ異なり、特に

粗粒な砂ではその値は低下する。

4) 土柱内の水の流れの定常化の確認および、測定不能状態の判定には、土柱内の吸引圧分布の経時測定が不可欠である。

5) 水位差による吸引定常法による不飽和透水係数の測定は、加圧定常法に比較し、装置が安価に揃えられ、かつ、土壌・フィルター間の接触性が改善される等の利点認められる。

#### 謝 辞

不飽和透水性測定の機会を最初に作って下さりかつ、御指導いただいた、前北海道農業試験場重粘地研究室長古畑 哲氏に深く感謝の意を表わします。

#### 引用文献

- 1) 長谷川周一・前田 隆：不飽和浸透流におけるダルシーの法則の適用—不飽和土壌水の運動に関する研究(I)—, 農土論集, 70, p.13~19 (1977)
- 2) 岩田進午：排水過程の水分運動の特質と圃場容水量, 農技研報B, 16, p.149~176 (1966)
- 3) 岩田進午：土壌物理測定法委員会編, 土壌物理測定法, 養賢堂, p.194~197 (1972)
- 4) KLUTE, A.: The Determination of the Hydraulic Conductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils, Soil Sci., 106, p.264~276 (1972)
- 5) 中野政詩：土壌物理研究会編, 土の物理学, 森北出版, p.239~248 (1979)

昭和56年3月3日受理