

## 土壤等多孔質物体の水分保持特性および不飽和透水係数の 同時連続計測法について

### Method of Continuous and Simultaneous Measurement of Water Retention Characteristics and Unsaturated Hydraulic Conductivity of Porous Materials as Soil

○原 道宏\*, 坂本亜沙子\*\*

○Michihiro Hara\*, Asako Sakamoto\*\*

\*岩手大学農学部, \*\*岩手大学農学部 (現在、盛岡市)

\*Iwate University, \*\*Iwate University(presently, Morioka City)

**キーワード:** 同時測定 (simultaneous measurement), 連続測定 (continuous measurement),  
水分保持特性 (water retention characteristics), 不飽和透水係数 (unsaturated hydraulic conductivity),  
土壤等多孔質物体 (porous materials as soil)

**連絡先:** 〒020-8550 盛岡市上田 3-18-8 岩手大学農学部農林環境科学科リサイクル生物生産工学講座環境  
制御工学研究室 原 道宏, TEL&FAX: (019)621-6125, E-mail: [mrhara@iwate-u.ac.jp](mailto:mrhara@iwate-u.ac.jp)

#### 1. はじめに

植物は生育過程において、葉の気孔を開いて大気から二酸化炭素を取り入れ、光合成を行う。このとき同時に葉は気孔をとおして蒸散により水を失う。蒸散により失われる水量は取り入れる二酸化炭素ガス量の、モル数にして、おおよそ、250 倍 (C<sub>4</sub> 植物: トウモロコシ、サトウキビなど)、ないし 500 倍 (C<sub>3</sub> 植物: イネ、コムギなど)、あるいは 50 倍 (CAM 植物: サボテンなど) と、いずれも莫大な量である。これは大気中の飽和水蒸気濃度が、例えば 30℃で約 4%であるのに対し、二酸化炭素濃度は現在 0.035%と、約 100 分の 1 の極めて低濃度であること、及び、分子量 (H<sub>2</sub>O=18, CO<sub>2</sub>=44) が小さい水は拡散係数が二酸化炭素の約 1.5 倍と大きく、移動しやすいことなどの相乗作用による。CAM 植物にお

いて上記数値が小さい理由は、温度の低い夜間にのみ気孔を開いて二酸化炭素を取り入れるという芸当を行っていることによる。

このような理由はともあれ、農作物を収穫するには収量の数百倍ないし数千倍の水量を必要とすることが経験的に知られており、必要水量はすべて根が土壤から吸収してまかなっている。さもなくば、生育も収穫も得られない。

植物根における吸水を促す要因として、「植物根に起因するもの」と「土壤等植物根を取り巻く培地に起因するもの」の二つが考えられるので、原ら (1994) は、前者を「植物の吸水態勢」、後者を「土壤の水分供給能力」と名付けた。水分供給能力を、原ら (1994) は「根に隣接する培地の水ポテンシャルが一定の時間パターンで低下した時に供給される水分量」と定義した。原・

宮本 (2001) は土壌の水分供給能力を表す解析解を導きだし、それによって土壌の水分供給能力を見積もることに成功した。

原・宮本 (2001) の方法により土壌の水分供給能力を見積もるためには、土壌の水分保持特性と不飽和透水係数を知ることが必要であり、本報はその方法を示すものである。本法は、原・宮本 (2001) において得られた知見に基づいて当該事項 (土壌の水分保持特性と不飽和透水係数) の同時連続測定方法を考案し、検討したものである。

## 2. 材料および方法

測定装置を図 1 に示す。

圧力釜の中の円筒容器(内径  $r=b$ )に供試土壌を入れ、中心線( $r=0$ )をあわせて素焼き管(外径  $r=a$ )を置き、圧力測定のためのテンシオメータを  $r=a$  および  $r=c=(a+b)/2$  の位置に設置する。

ここで、 $r=(a+b)/2$  の位置は、原・宮本 (2001) の解析により、土壌の平均水分率を示す位置であることが知られており、この位置における水圧と土壌の体積含水率を対応させることにより土壌の水分保持特性が得られるわけである。

土壌資料は、はじめ、下端から給水し、水分飽和する。ついで、自動圧力調節器により一定圧力の気体を発生し、土壌から素焼き管に水移動を促す。土壌から素焼き管を通して排出された水は流量計を通して水受け容器に導かれ、総排水量が電子天秤により計測される。使用した流量計は流量調節計であり、流量を一定にする機能を有する。この機能を用いて、測定は一定流量の排水を得る形でおこなった。測定項目は、点  $r=a$ ,  $r=c=(a+b)/2$  における水圧、排水流量および排水総量である。土壌の体積含水率は排水総量から計算される。

## 3. 不飽和透水係数の算出

上記の測定により、水分保持特性が直ち

に得られる。残るは不飽和透水係数の値の計算である。これは次のようにおこなった。

### 不飽和透水係数の計算方法

円筒座標系における不飽和状態における水移動の公式は、原・宮本 (2001) により、

$$\phi[r] - \phi[a] = \frac{Q}{2\pi L (b^2 - a^2)} \left( b^2 \ln\left[\frac{r}{a}\right] - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \quad [1]$$

と得られた。 $Q$  が流量、 $L$  は素焼き管の長さである。 $\phi$  は不飽和透水係数の水圧に関する積分であり、マトリックフラックスポテンシャルと呼ばれる。

$$\phi = \int K[h] dh \quad [2]$$

この式の意味するところは、流量  $Q$  とマトリックフラックスポテンシャル差  $\phi[r] - \phi[a]$  は比例関係にあることであり、比例係数は位置座標  $a, r$  と素焼き管長さ  $L$  により定まる関数である、といことである。すなわち、流量  $Q$  を測定することにより、マトリックフラックスポテンシャル差  $\phi[r] - \phi[a]$  が求まるということである。そこで、筆者は、求められたマトリックフラックスポテンシャル差  $\phi[r] - \phi[a]$  から不飽和透水係数を求める方法を考案した。なお、今回の測定において、上述のように、 $r$  は  $r=c=(a+b)/2$  である。すなわち、

$$\phi[c] - \phi[a] = \frac{Q}{2\pi L (b^2 - a^2)} \left( b^2 \ln\left[\frac{c}{a}\right] - \frac{c^2 - a^2}{2} \right) \quad [3]$$

である。点  $a, c$  における水圧  $h[a]$  と  $h[c]$  が測定されているので平均透水係数

$$K = (\phi[c] - \phi[a]) / (h[c] - h[a]) \quad [4]$$

は直ちに計算される。中間値の定理により、水圧  $h[a]$  と  $h[c]$  の中間の水圧  $h$  における不飽和透水係数  $K$  であるはずであるが、問題は、この平均透水係数に対応する水圧  $h$  の値は何か、ということである。

筆者は、不飽和透水係数  $K$  がマトリックポテンシャル  $h$  の指数関数であると仮定した。これは多くの土壌で見られることであり、妥当な仮定と考えられる。すると、

$$K = K[h] = K_0 e^{\beta h} \quad [5]$$

$$\phi = \int K[h] dh = \frac{K_0}{\beta} e^{\beta h} + C \quad [6]$$

が得られ、

$$\phi[c] - \phi[a] = \frac{K_0}{\beta} (e^{\beta h[c]} - e^{\beta h[a]}) \quad [7]$$

となるので、

$$K = \frac{K_0}{\beta} \left( \frac{e^{\beta h[c]} - e^{\beta h[a]}}{h[c] - h[a]} \right) \quad [8]$$

となる。ここで、問題はこの  $K$  を満たす水圧  $h$  の値である。方程式

$$K[h] = K_0 e^{\beta h} = \frac{K_0}{\beta} \left( \frac{e^{\beta h[c]} - e^{\beta h[a]}}{h[c] - h[a]} \right) \quad [9]$$

すなわち、

$$e^{\beta h} = \frac{1}{\beta} \left( \frac{e^{\beta h[c]} - e^{\beta h[a]}}{h[c] - h[a]} \right) \quad [10]$$

を満たす  $h$  を求める方法が問題となる。 $h[a]$  と  $h[c]$  は測定されているが、係数  $\beta$  が未知である。とりあえず、

$$\lambda = \beta (h[c] - h[a]) \quad [11]$$

とおくと、

$$e^{\beta (h-h[a])} = \frac{e^{\lambda} - 1}{\lambda} \quad [12]$$

が得られ、

$$\beta (h - h[a]) = \text{Ln} \left[ \frac{e^{\lambda} - 1}{\lambda} \right] \quad [13]$$

と表される。ついで、

$$r = \frac{h - h[a]}{h[c] - h[a]} = \frac{\text{Ln} \left[ \frac{e^{\lambda} - 1}{\lambda} \right]}{\lambda} \quad [14]$$

が直ちに得られる。問題は、 $\lambda$  が未知なことである。

ここで、測定において流量  $Q$  を一定にしたことを想起する。すなわち、

$$\phi[c] - \phi[a] = \frac{Q}{2\pi L (b^2 - a^2)} \left( b^2 \ln \left[ \frac{c}{a} \right] - \frac{c^2 - a^2}{2} \right) \quad [15]$$

は、測定の期間中、一定である。言い換えれば、

$$\phi[c] - \phi[a] = \frac{K_0}{\beta} (e^{\beta h[c]} - e^{\beta h[a]}) \quad [16]$$

が、時間に関わらず一定である。水圧  $h[a]$  と  $h[c]$  は時間の関数であるので、それらの時間微分を、 $h'[a]$  および  $h'[c]$  とおけば、つぎの関係が成り立つ。

$$h'[c] e^{\beta h[c]} - h'[a] e^{\beta h[a]} = 0 \quad [17]$$

これより、

$$\frac{e^{\beta h[c]}}{e^{\beta h[a]}} = \frac{h'[a]}{h'[c]} \quad [18]$$

を経て、

$$e^{\lambda} = \frac{h'[a]}{h'[c]} \quad [19]$$

$$\lambda = \text{Ln} \left[ \frac{h'[a]}{h'[c]} \right] \quad [20]$$

が得られる。

以上をまとめると、次のようになる。

#### 不飽和透水係数の計算手順

(1) 長さ  $L$ 、内径  $b$  の円筒土壌の中心に長さ  $L$ 、半径  $r=a$  の吸水円筒をおき、一定流量  $Q$  を吸水し、発生する水圧の、半径  $r=a$  および  $r=c=(a+b)/2$  における値  $h[a]$  と  $h[c]$  の時間経過を測定により求める。

(2) 水圧  $h[a]$  と  $h[c]$  の時間微分を  $h'[a]$  および  $h'[c]$  とおく。パラメータ  $\lambda$  を、

$$\lambda = \text{Ln} \left[ \frac{h' [a]}{h' [c]} \right] \quad [21]$$

により求める。これより、按分比  $r$  を、

$$r = \frac{\text{Ln} \left[ \frac{e^{\lambda} - 1}{\lambda} \right]}{\lambda} \quad [22]$$

を求める。これより、水圧の中間値  $h$

$$h = (1 - r) h[a] + r h[c] \quad [23]$$

を求める。この  $h$  に対応する不飽和透水係数  $K$  は、

$$\phi[r] - \phi[a] = \frac{Q}{2\pi L (b^2 - a^2)} \left( b^2 \ln \left[ \frac{r}{a} \right] - \frac{r^2 - a^2}{2} \right) \quad [24]$$

$$K = (\phi[c] - \phi[a]) / (h[c] - h[a]) \quad [25]$$

である。このようにして、 $K=K[h]$  が  $h$  の関数として得られる。

#### 水分保持特性の計算手順

上述の計算手順において、 $h[c]$  は土壤の平均含水率に対応する水圧である。土壤の初期含水率を  $\theta[0]$  とすれば、

土壤の体積  $V_s$  は

$$V_s = \pi (b^2 - a^2) L \quad [26]$$

であるので、一定流量  $Q$  で時間  $t$  のあいだ吸水された土壤の体積含水率は  $\theta[t]$  は、

$$\theta[t] = \theta[0] - \frac{Qt}{V_s} \quad [27]$$

この体積含水率は  $\theta[t]$  に対応する水圧が  $h[c]$  であるので、 $\{h[c], \theta[t]\}$  がそのまま水分保持特性となる。

#### 4. 結果

流量  $Q=400 \mu\text{L}/\text{min}$  で吸水したとき得られたテンション ( $T=h$ ) と流量の時間経過、それを上述のように処理して得られる不飽

和透水係数と水圧の関係を図に示す。

#### 結論

以上から次のことがいえる。

- (1) 提示した方法により、土壤の不飽和透水係数と水分保持特性を同時に、土壤水圧および体積含水率の連続的な関数として測定することができた。
- (2) 水圧が 0 に近い領域では  $a$  点と  $c$  点における水圧差が小さく、測定の精度が劣る。しかし、不飽和透水係数が問題になるのは水圧が低いところであるから、そこではこの欠点は影響しない。
- (3) より水圧の低いところで測定するためには、さらに高压領域をカバーする装置を用いる必要があると考えられる。

#### 引用・参考文献

- 原 道宏, 宮本和佳 2001 非線形拡散係数物質を媒体とする円筒吸源における吸収速度の潤定常仮定による推定について 計測自動制御学会東北支部第 194 回研究集会資料 194-13, 1-15.
- 坂本亜沙子 2003 植物根の吸水速度に及ぼす土壤物理性の測定及びその測定環境の整備 岩手大学農学部卒業論文 52p.

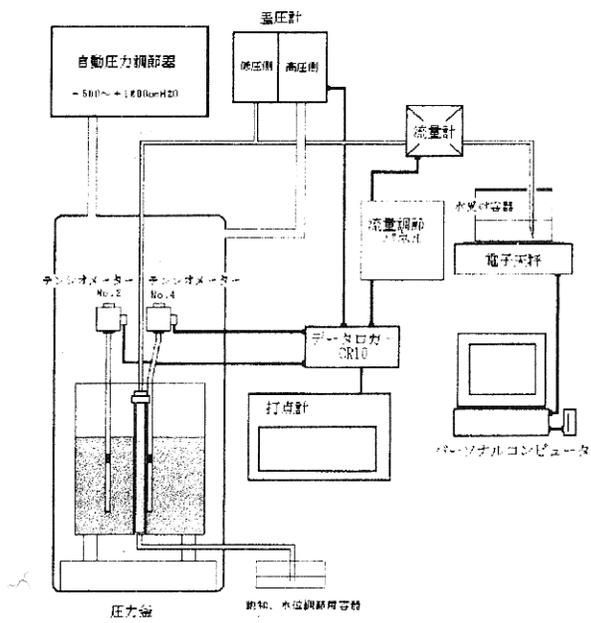


図1 水分保持特性および不飽和透水係数の同時連続測定装置の概念図

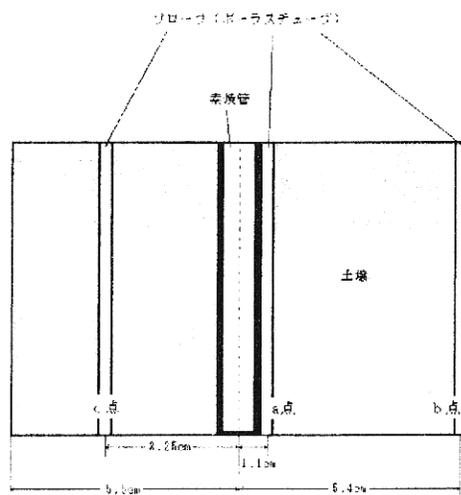


図2 土壌、吸水素焼管と圧力測定位置  
a=1.1, b=5.4, c=3.25 cm

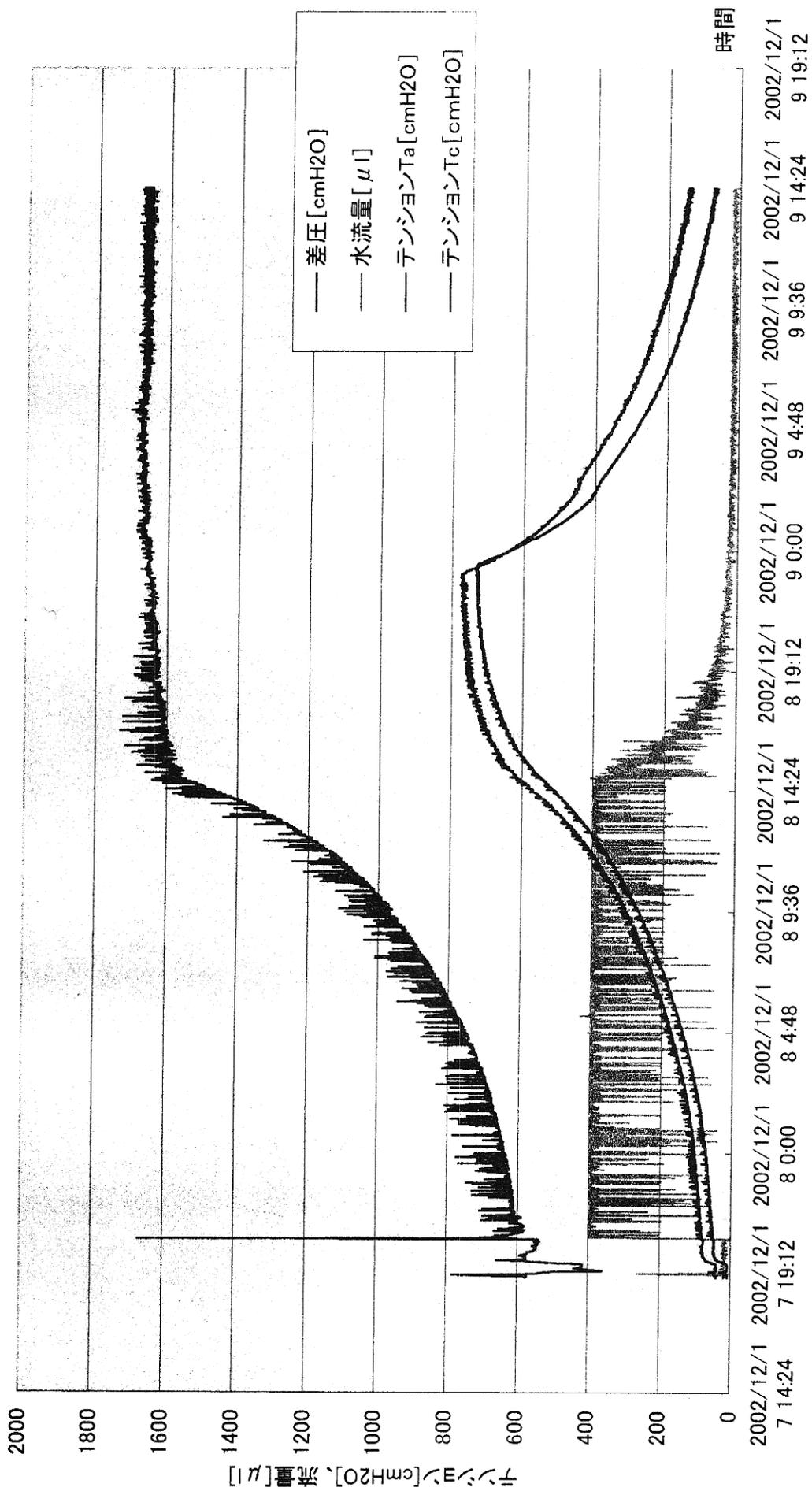


図3 データロガーCR10から得られたデータの全体

印加圧力900cmH2O  
設定流量 0.4ml

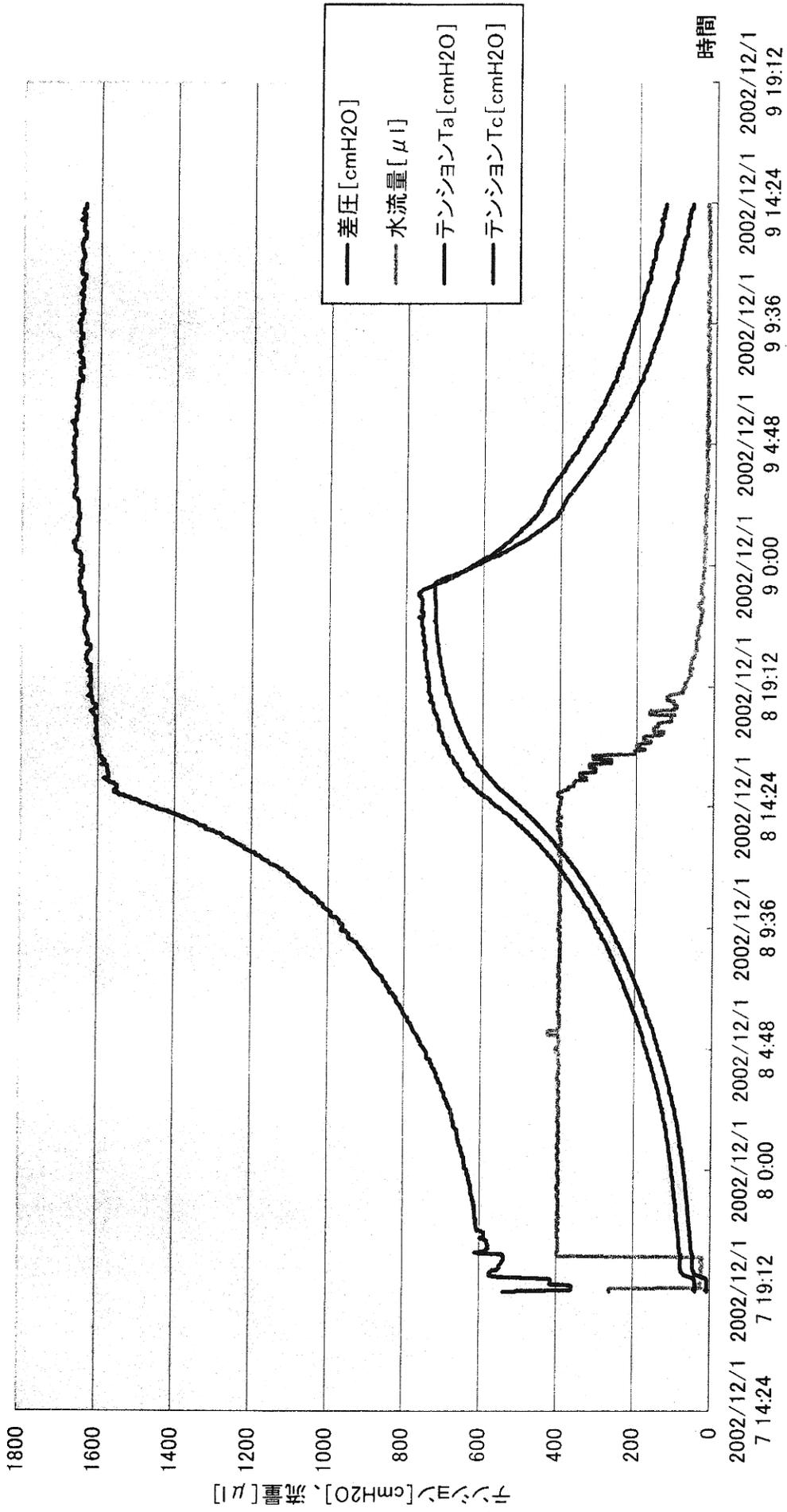


図4 データロガーCR10より得られたデータから雑音を除去  
ノイズを除去した全体像

印加圧力900cmH2O  
設定流量 0.4ml

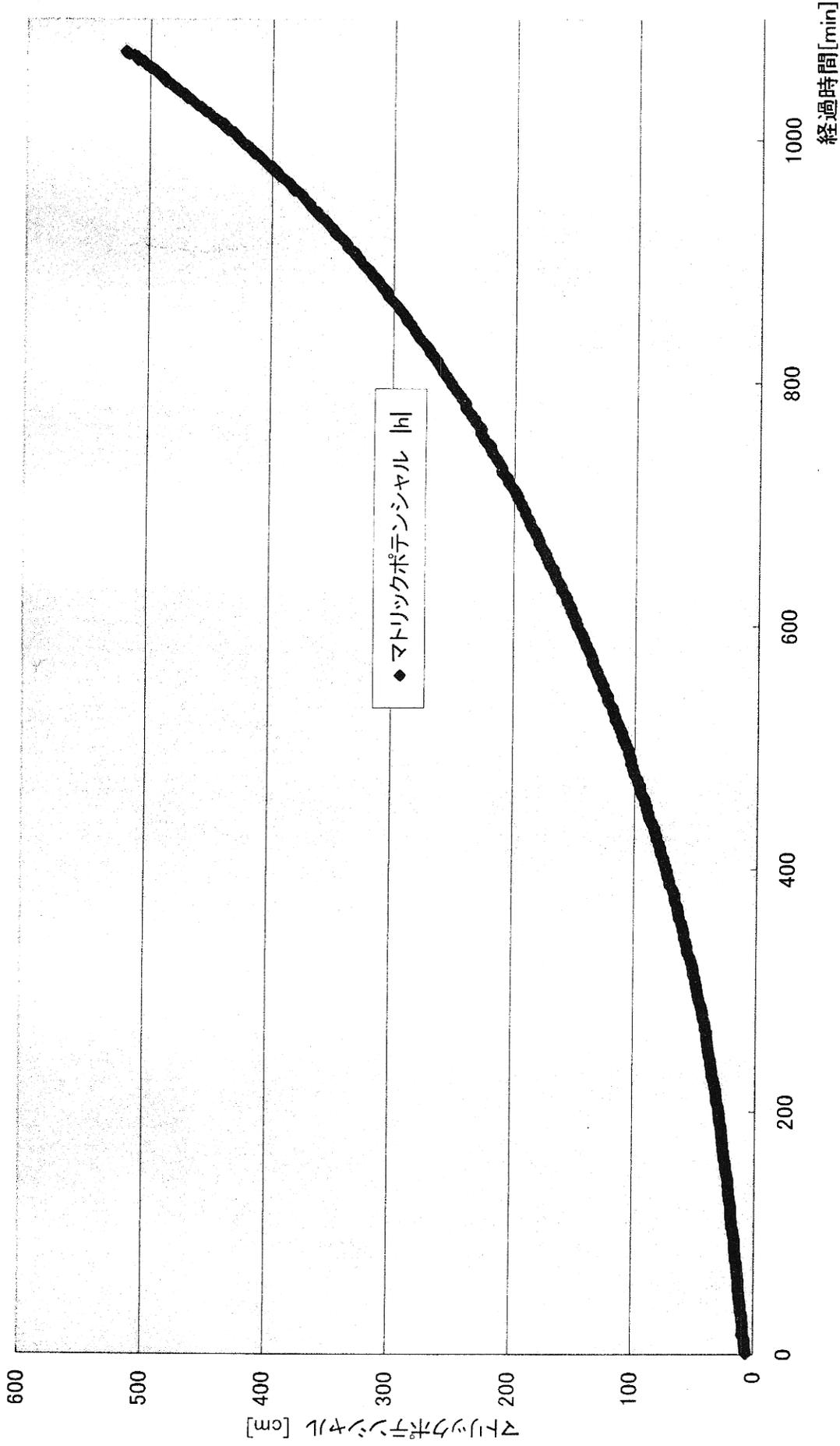


図5 マトリックポテンシャル|h|の時間変化

印加圧力 900cmH<sub>2</sub>O  
設定流量 0.4ml

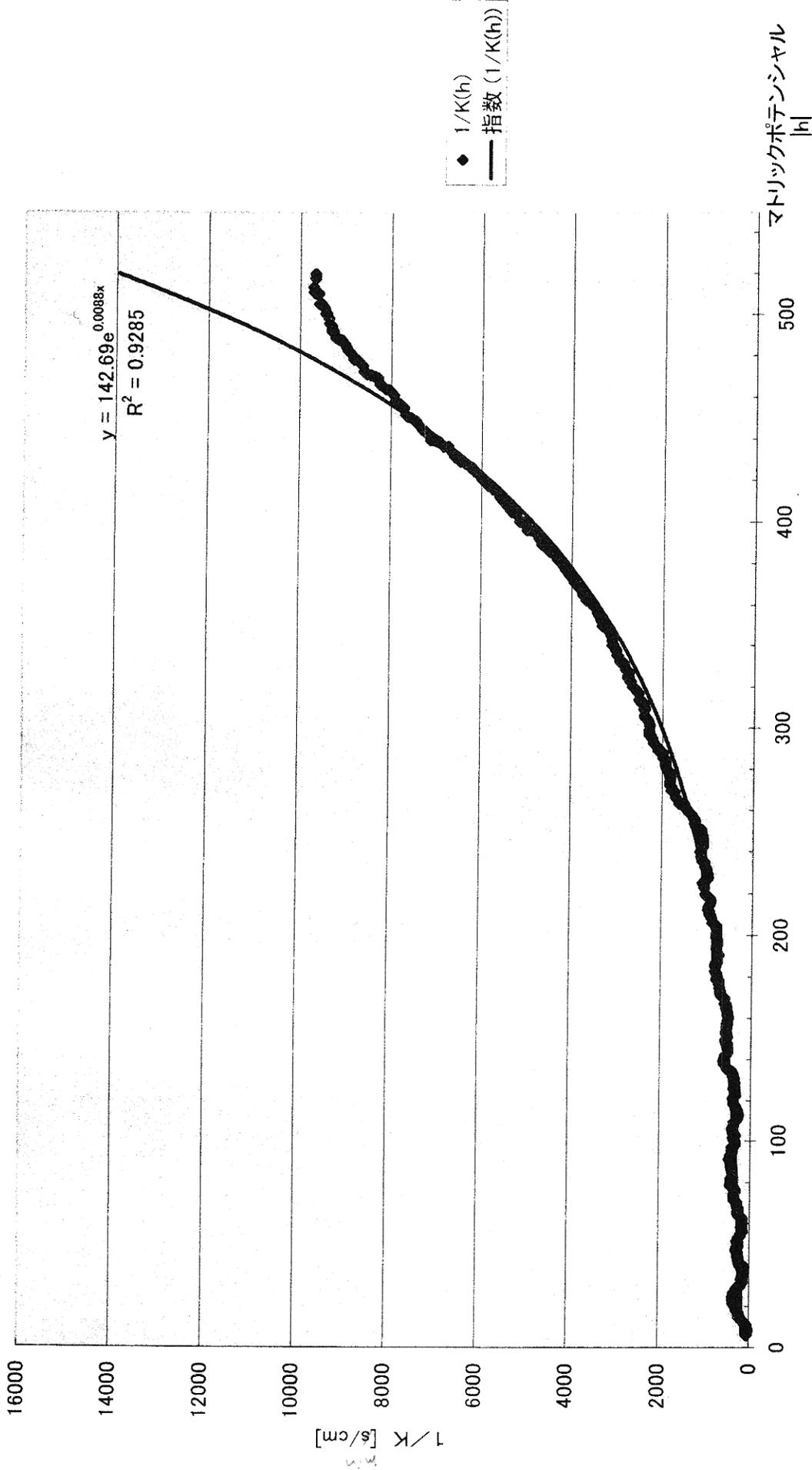


図6 透水係数 $K(h)$ の逆数とマトリックポテンシャル $|h|$ との関係  
および指数近似曲線

印加圧力 900cmH<sub>2</sub>O  
設定流量 0.4ml