

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2006-308433
(P2006-308433A)

(43) 公開日 平成18年11月9日(2006.11.9)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 P 5/10 (2006.01)	GO 1 P 5/10 Z	2GO40
GO 1 N 25/18 (2006.01)	GO 1 N 25/18 Z	
AO 1 G 7/00 (2006.01)	AO 1 G 7/00 603	

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号	特願2005-131711 (P2005-131711)	(71) 出願人	504155293 国立大学法人島根大学 島根県松江市西川津町1060
(22) 出願日	平成17年4月28日(2005.4.28)	(74) 代理人	100116861 弁理士 田邊 義博
		(72) 発明者	森 也寸志 島根県松江市西川津町1060 国立大学 法人島根大学内
		(72) 発明者	石井 将幸 島根県松江市西川津町1060 国立大学 法人島根大学内
		Fターム(参考)	2G040 AB08 BA03 BB04 CA02 CB02 DA02 DA12 EA02 EB02 GA05 GA07 HA16 ZA05

(54) 【発明の名称】 土壌水移動速度導出方法および土壌水移動速度測定装置

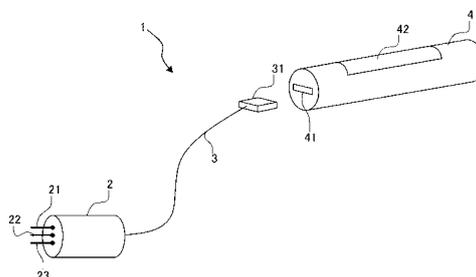
(57) 【要約】

【課題】多大なコンピュータ資源を必要とせず簡便に土壌水移動速度を即時的に導出可能な方法を提供すること。

【解決手段】

本発明の土壌水移動速度導出方法は、土壌中の水の移動速度 J を導出する方法であって、測定場所である土壌中の水の移動方向に沿った一直線上に、二つの温度センサ 2 1 および 2 3 とヒータ 2 2 とを、温度センサ 2 1 - ヒータ 2 2 - 温度センサ 2 3 の順に、かつ、ヒータ 2 2 の ON - OFF に基づく熱伝導を感受可能な距離内に二つの温度測定端子 2 1 および 2 3 を並べ、あらかじめ測定しておいた当該土壌の熱拡散係数 (定数) を用い、微分形式で表現される式 (1) に基づいて当該土壌における熱フラックス V を求め、この熱フラックス V とあらかじめ測定しておいた当該土壌の熱容量 C_s (定数) とを用いて、式 (2) により当該土壌の水の移動速度 J を導出する。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

土壌中の水の移動速度 J を導出する方法であって、

測定場所である土壌中の水の移動方向に沿った一直線上に、二つの温度測定端子と熱源端子とを、温度測定端子 - 熱源端子 - 温度測定端子の順に、かつ、熱源端子の ON - OFF に基づく熱伝導を感受可能な距離内に二つの温度測定端子を並べ、

あらかじめ測定しておいた当該土壌の熱拡散係数（定数）を用い、微分形式で表現される式（1）に基づいて当該土壌における熱フラックス V を求め、

この熱フラックス V とあらかじめ測定しておいた当該土壌の熱容量 C_s （定数）とを用いて、式（2）により当該土壌の水の移動速度 J を導出することを特徴とする土壌水移動速度導出方法。

10

【数 1】

$$\frac{\partial T_d}{\partial T_u} = \frac{\left[\frac{1}{t} \exp \left\{ -\frac{(x_d - Vt)^2}{4\kappa t} \right\} - \frac{1}{t - t_0} \exp \left\{ -\frac{(x_d - V(t - t_0))^2}{4\kappa(t - t_0)} \right\} \right]}{\left[\frac{1}{t} \exp \left\{ -\frac{(-x_u - Vt)^2}{4\kappa t} \right\} - \frac{1}{t - t_0} \exp \left\{ -\frac{(-x_u - V(t - t_0))^2}{4\kappa(t - t_0)} \right\} \right]} \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

20

T_u : 上流側温度測定端子の位置における温度

T_d : 下流側温度測定端子の位置における温度

x_u : 上流側温度測定端子と熱源端子との間隔（定数）

x_d : 下流側温度測定端子と熱源端子との間隔（定数）

t : 時間

t_0 : 熱源端子における熱の印加時間（定数）

【数 2】

30

$$J = \frac{C_s}{C_w} V \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

40

C_w : 水の熱容量（定数）

【請求項 2】

土壌中の水の移動速度 J を測定する装置であって、

外部に露出し、一直線上に温度測定端子 - 熱源端子 - 温度測定端子の順に並ばせた熱源端子および二つの温度測定端子と、

熱源端子が所定時間 t_0 の間発熱するように制御する熱源制御部と、

あらかじめ測定しておいた当該土壌の熱拡散係数（定数）および当該土壌の熱容量 C_s （定数）を用い微分形式で表現される式（1）および式（2）に基づいて、当該土壌の水の移動速度 J を算出する演算チップと、

演算チップにより算出された移動速度 J を出力する出力部と、

50

を具備したことを特徴とする土壌水移動速度測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、土壌水移動速度導出方法および土壌水移動速度測定装置に関し、特に、1カ所の測定地点のみで水の移動速度をモニタリング可能な土壌水移動速度導出方法および土壌水移動速度測定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

農学や環境工学では、土壌中の水の移動速度を知ることは極めて重要である。例えば、農学分野では、肥料が農作物の生育に有効に使われたのか、それとも、肥料が地下水に流出してしまったのか、を知る上で重要である。また、環境工学の分野では、汚染物質が土壌に漏出した場合に、その土壌汚染物質が移動しているのかいないのか、いるとすれば、地下水領域に到達するのに何年かかるか、ということを知る上で重要である。

10

【0003】

水の移動を測定するために、従来では、数十センチ離れた2カ所にプローブを差し込んで透水係数を掛け合わせるダルシーの法則に基づく速度導出方法が知られていた。また、ヒータから熱パルスを放出し、数ミリ離れた場所における温度の上昇下降を測定して水の速度を求めるヒートパルス法に基づく方法も知られていた。

20

【0004】

【特許文献1】特開2003-329625号公報

【非特許文献1】Y.mori, et al 'Multi-Functional Heat Pulse Probe for the Simultaneous Measurement of Soil Water Content, Solute Concentration, and Heat Transport Parameters' Published in Vadose Zone Journal 2:561-571(2003)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、従来の技術では以下の問題点があった。

すなわち、土壌中の水は、ほとんどの場合鉛直上方から鉛直下方に流れるため、ダルシーの法則に基づく方法では、2つのプローブのうちの少なくとも一方は深い場所に差し込む必要があり手間がかかるという問題点があった。

30

【0006】

また、この方法では、透水係数の非線形性や空間変動性が強いため、求めた数値が真値に近いのかどうか、必ずしも精度が高くないという原理的な問題点があった。

【0007】

また、ヒートパルス法に基づく方法では、上記のような問題点は解消されるが、解を得るべき方程式が式(3)で表現される積分形式であるので、多大なコンピュータ資源が要求されるという問題点があった。すなわち、一つの解(一カ所の測定点における流速)を得るために、専用のソフトウェアを用いて数分以上の計算が必要となり、実質的にモニタリング(即時計測)が不可能であるという問題点があった。特に、土壌のモニタリングは数十カ所以上で評価する必要がある場合が多く、この問題点がいつそう顕著となってくる。

40

【0008】

【数 1】

$$\frac{\partial T_d}{\partial T_u} = \frac{\left[\frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(x_d - Vt)^2}{4\kappa t}\right\} - \frac{1}{t-t_0} \exp\left\{-\frac{(x_d - V(t-t_0))^2}{4\kappa(t-t_0)}\right\} \right]}{\left[\frac{1}{t} \exp\left\{-\frac{(-x_u - Vt)^2}{4\kappa t}\right\} - \frac{1}{t-t_0} \exp\left\{-\frac{(-x_u - V(t-t_0))^2}{4\kappa(t-t_0)}\right\} \right]} \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

10

【0009】

本発明は上記に鑑みてなされたものであって、多大なコンピュータ資源を必要とせず簡便に土壌水移動速度を即時的に導出可能な方法を提供することを目的とする。

【0010】

また、土壌水移動速度を簡便にモニタリング可能で可搬な装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

上記の目的を達成するために、請求項 1 に記載の土壌水移動速度導出方法は、土壌中の水の移動速度 J を導出する方法であって、測定場所である土壌中の水の移動方向に沿った一直線上に、二つの温度測定端子と熱源端子とを、温度測定端子 - 熱源端子 - 温度測定端子の順に、かつ、熱源端子の ON - OFF に基づく熱伝導を感受可能な距離内に二つの温度測定端子を並べ、あらかじめ測定しておいた当該土壌の熱拡散係数（定数）を用い、微分形式で表現される式（1）に基づいて当該土壌における熱フラックス V を求め、この熱フラックス V とあらかじめ測定しておいた当該土壌の熱容量 C_s （定数）とを用いて、式（2）により当該土壌の水の移動速度 J を導出することを特徴とする。

20

【0012】

【数 2】

$$J = \frac{C_s}{C_w} V \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

30

ただし、

T_u : 上流側温度測定端子の位置における温度

T_d : 下流側温度測定端子の位置における温度

x_u : 上流側温度測定端子と熱源端子との間隔（定数）

x_d : 下流側温度測定端子と熱源端子との間隔（定数）

t : 時間

t_0 : 熱源端子における熱の印加時間（定数）

【0013】

40

【数 3】

$$T_d - T_u = \Delta T = \frac{q}{4\pi C_s K} \left[\int_{-t_0}^{\cdot} s^{-1} \exp\left\{-\frac{(x_d - Vs)^2}{4\kappa s}\right\} ds - \int_{-t_0}^{\cdot} s^{-1} \exp\left\{-\frac{(-x_u - Vs)^2}{4\kappa s}\right\} ds \right] \dots (3)$$

ただし、

10

C_w : 水の熱容量 (定数)

【0014】

すなわち、請求項1にかかる発明は、水の移動方向に沿った方向の一直線上に端子を並べることにより解析式が微分形式で表現可能に簡略化でき、積分形式に比べて著しく計算回数を低減させることが可能となる。なお、

$$C_s = c_s \rho_s + c_w \rho_w$$

$$C_w = c_w \rho_w$$

なる式で現され、 c_s および c_w はそれぞれ土壌の比熱と水の密度を、 ρ_s および ρ_w はそれぞれ土壌の密度と水の密度を現す (その具体的数値例は後述する)。また、 ρ_s は土壌に含まれる体積あたりの水分率 (体積含水率) であって、実験状況に応じて変わる値である。なお、 C_w は定数として扱って差し支えなく、 C_s に関してもひとくくりの数値として求められるため、実際には土壌の水分量を特に意識する必要はない。なお、熱容量 C_s や拡散係数 K は実験毎に求められる数値である。

20

【0015】

また、請求項2に記載の土壌水移動速度測定装置は、土壌中の水の移動速度 J を測定する装置であって、外部に露出し、一直線上に温度測定端子 - 熱源端子 - 温度測定端子の順に並べた熱源端子および二つの温度測定端子と、熱源端子が所定時間 t_0 の間発熱するように制御する熱源制御部と、あらかじめ測定しておいた当該土壌の熱拡散係数 (定数) および当該土壌の熱容量 C_s (定数) を用い微分形式で表現される式 (1) および式 (2) に基づいて、当該土壌の水の移動速度 J を算出する演算チップと、演算チップにより算出された移動速度 J を出力する出力部と、を具備したことを特徴とする。

30

【0016】

すなわち、請求項2にかかる発明は、水の移動方向に沿った方向の一直線上に端子を並べることにより解析式が微分形式で表現可能に簡略化でき、積分形式に比べて著しく計算回数を低減させることが可能となるので、解析を担わせる部分をチップ化でき、制御部を含めて、小型の可搬な大きさとすることができる。

【0017】

なお、本願では、例えば、温度測定端子 - 熱源端子 - 温度測定端子が一直線に並んだ方向に垂直な方向にも温度測定端子を複数設け (例えば、上記直線を挟んだ両側)、水の移動方向の補正を加えることも、請求項にいう「水の移動方向に沿った一直線上に、 \dots 、温度端子を並べる」との記載に含まれるものとする。これは、原理的に、移動方向を補正するだけであり、移動方向に沿って速度 J を算出する本願発明と原理と等価であるからである。

40

【発明の効果】

【0018】

本発明の土壌水移動速度導出方法 (請求項1) によれば、水の移動方向に沿った方向の一直線上に端子を並べることにより解析式が微分形式で表現可能に簡略化でき、積分形式に比べて著しく計算回数を低減させることが可能となるので、多大なコンピュータ資源を必要とせず簡便に土壌水移動速度を即時的に導出可能となる。

【0019】

50

また、本発明の土壌水移動速度導出方法（請求項２）は、水の移動方向に沿った方向の一直線上に端子を並べることにより解析式が微分形式で表現可能に簡略化でき、積分形式に比べて著しく計算回数を低減させることが可能となるので、解析を担わせる部分をチップ化でき、制御部を含めて、小型で可搬な大きさとする事ができる。これにより、土壌水移動速度を簡便にモニタリング可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

【００２０】

以下、本発明の実施の形態を図面を参照しながら詳細に説明する。

図１は、本発明のモニタリング装置の一構成例を示した図である。図示したように、モニタリング装置１は、プローブ部２と、ケーブル部３と、解析表示部４とから構成される。プローブ部２は、３つの一直線上に並んだ端子から構成されている。これらは、それぞれ、温度センサ２１と、ヒータ２２と、温度センサ２３である。

10

【００２１】

プローブ部２からはケーブル部３が延伸し、このケーブル部３の他端は、解析表示部４に接続可能なソケット３１が形成されている。プローブ部２は、ケーブル部３とともに、モニタリングをおこないたい地中、例えば、３０ｃｍに埋設される。なお、プローブ部２は、円筒が横になるように、すなわち、温度センサ２１とヒータ２２と温度センサ２３の先端が鉛直方向に並ぶように地中に埋設する。これは、後述するように、これらの端子が水の流れに沿った配置とする必要があるためであるが、地中を含め、ベイドース・ゾーン（Vadose Zone：地表から地下水面までの土壌層）では、ほとんどの場合、水の流れが鉛直方向となるためである。

20

【００２２】

解析表示部４は、ソケット３１の差込口であるソケット受４１と、水の移動速度を表示する表示部４２と、図には表れない解析部４４と、制御部４３と、電源４５と、を備える。図２は、解析表示部４を中心としたモニタリング装置１の機能的な構成を表したブロック図である。制御部４３は、ケーブル部３を介してヒータ２２の発熱ＯＮ－ＯＦＦの制御をおこなう。また、制御部４３は、温度センサ２１および温度センサ２３からの温度情報を取得する。解析部４４は、制御部４３が駆動したヒータ２２の加熱時間や取得した温度情報から、プローブ部２が埋設された土壌の水の移動速度を導出する。導出に用いる解析計算については後述する。得られた移動速度は、表示部４２で表示される。

30

【００２３】

このような構成とすれば、計測者が解析表示部４だけ持ち歩き、測定点から地上に露出しているソケット３１をつなぐだけで、順次各測定点における水の移動速度をモニタリングできる。なお、使用の態様によっては、総ての測定点に解析表示部４を接続しておき、表示部４２の代わりに記録部を設け、制御部４３により定期的に水の移動速度を測定して記録部に記録させるようにしてもよい。これにより長期的なモニタリング（一日の変化、季節による変化）が可能となる。

【００２４】

次に、解析部４４について説明する。本願発明者等は、従来積分形式でしか表現されていなかった水の移動速度に関する解析方法を、所定条件下で本モニタリング装置１を用いた場合に微分形式で表現可能となることを発見した。

40

【００２５】

従来では、式（３）を解析することにより V を求めていたが、一点法に基づく場合はノイズの影響を受けて結果の信頼性が低い場合があり、もしくは、最適化同定方法により良い結果を導出する場合は時間がかかりすぎるという不具合点があった。

【００２６】

すなわち、本願発明者等は、従来では、式（３）に表される上流および下流の温度の変化を解析するという手法に代えて、上流側の温度センサの温度変化と下流側の温度センサの温度変化とをそれぞれ温度の変化割合として把握する方が、精度的にも計算時間的にも計算に有利であるとの発見に基づき本発明を着想するに至った。

50

【数 7】

$$\frac{\partial T_u}{\partial t} = \frac{q}{4\pi C_s \kappa} \left[\frac{1}{t} \exp \left\{ -\frac{(-x_u - Vt)^2}{4\kappa t} \right\} - \frac{1}{t-t_0} \exp \left\{ -\frac{(-x_u - V(t-t_0))^2}{4\kappa(t-t_0)} \right\} \right] \cdot \cdot \cdot \quad (7)$$

【実施例 1】

【0034】

次に、モニタリング装置 1 を用いた検証実験をおこなうこととした。検証に際しては、マルチステップ流出法試験をおこない、実際の流量値と、モニタリング装置 1 を用いた解析結果を比較することとした。 10

【0035】

図 3 は、本実験系の概略構成を示した図である。これは、ごく簡単に説明すると、円筒容器に鳥取砂丘の砂をつめ、上部から水滴をたらし、下部からしたたり落ちてくる水滴量に基づいて水の移動速度を実測値として測定する装置である。なお、円筒容器にはプローブ部 2 を差し込み別途数値的にも流速を計算可能なようにしている。なお、上部から水滴をたらず時間を調整し、下部からしたたり落ちる量（排水量）を測定した結果を図 4 に示す。図で示したように、実験開始から、250 分後、500 分後、1000 分後、1700 分後におもだった滴下をおこなうこととした。なお、排水量に変化していない時間は水の移動が生じていない時間である。 20

【0036】

なお、用いたプローブ部 2 の温度センサ 21 とヒータ 22、および、温度センサ 23 とヒータ 22 との距離は、共に 6.00 mm に調整したものであり、ヒータの加熱時間 t_0 は 8 秒間とした。図 5 は、上流側の温度センサ（温度センサ 21）と、下流側の温度センサ（温度センサ 22）、のヒータ加熱前からの温度差の経時変化を示した図である。図示したように、下流側の温度センサは、水流によって多くの熱が効率よく伝搬するので、高いピークを示している。

【0037】

また、このほか、この実験での土壌の熱拡散係数は $6.5 \times 10^{-7} \text{ [m}^2 \text{ s}^{-1} \text{]}$ であり、比熱 $c_s = 0.795 \text{ [J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{]}$ 、充填密度 $\rho_s = 1.63 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3} \text{]}$ である。なお、これらの数値は実験に先立ちあらかじめ測定しておいたものである。また、水の比熱として $c_w = 4.18 \text{ [J g}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{]}$ を、密度として $\rho_w = 0.998 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3} \text{]}$ を用いた。 30

【0038】

図 6 は、モニタリング装置 1 による流速測定結果（計算値）と実測値との関係を、滴下速度を様々に振って示した図である。図から明らかなように、モニタリング装置の結果と実測値は、絶対値の観点からも極めて近似した値であることが確認できた。換言すれば、モニタリング装置 1 は、少なくとも測定した範囲である水の移動速度が、 $0.1 \sim 27 \text{ [m/day]}$ ($1.15 \times 10^{-6} \sim 3.13 \times 10^{-4} \text{ [m/s]}$) の範囲であれば十分信頼性がある結果であるといえる。 40

【0039】

なお、モニタリング装置 1 による測定結果は、数秒で得られるのに対し、従来手法では、CPU = 2.4 GHz、RAM = 512 MB、解析専用ソフトウェア MATHCAD 11 (Mathsoft Engineering & Education 社製 (米国)) を用いて、2 ~ 3 分必要であった。この点からも、モニタリング装置 1 の方が、従来手法よりも、大きさの観点からも解析時間の観点からも、コストの観点からも優れていることがいえる。

【0040】

なお、以上は、いわゆる飽和系、すなわち、土砂間に水のみが充満している系における解析であるが、いわゆる不飽和系、すなわち、土砂間に空気（微細気泡）も混在している 50

系でも同様に測定可能であることを確認した。

【産業上の利用可能性】

【0041】

本発明を用いれば、農業では効率的な施肥タイミングを知ることができ、また、効果的な施肥量も評価可能となる。また、本発明を用いれば、例えば化学工場周辺では、汚染モニタリングが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0042】

【図1】本発明のモニタリング装置の一構成例を示した図である。

【図2】解析表示部を中心としたモニタリング装置の機能的な構成を表したブロック図である。 10

【図3】本実験系の概略構成を示した図である。

【図4】本実験系における滴下の様子を示した図である。

【図5】上流側の温度センサと、下流側の温度センサの、ヒータ加熱前からの温度差の経時変化を示した図である。

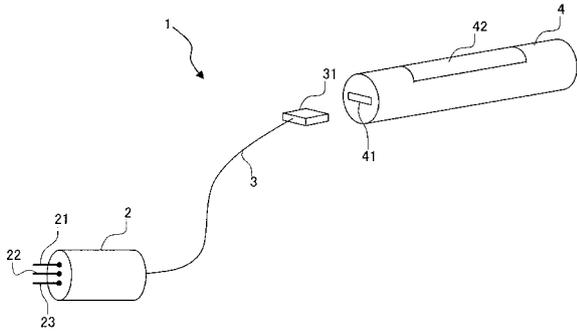
【図6】モニタリング装置による流速測定結果と実測値との関係を、滴下速度を様々に振って示した図である。

【符号の説明】

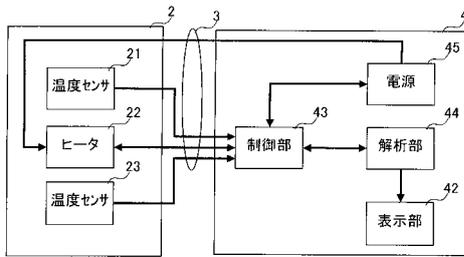
【0043】

1	モニタリング装置	20
2	プローブ部	
3	ケーブル部	
4	解析表示部	
2 1	温度センサ	
2 2	ヒータ	
2 3	温度センサ	
3 1	ソケット	
4 1	ソケット受	
4 2	表示部	
4 3	制御部	30
4 4	解析部	
4 5	電源	

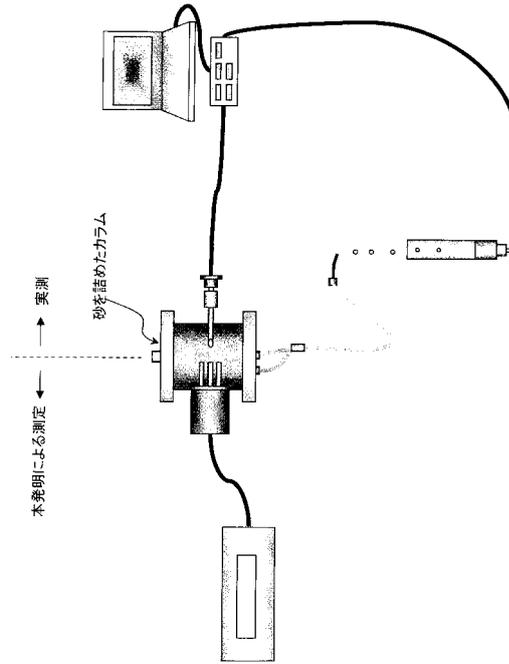
【図1】



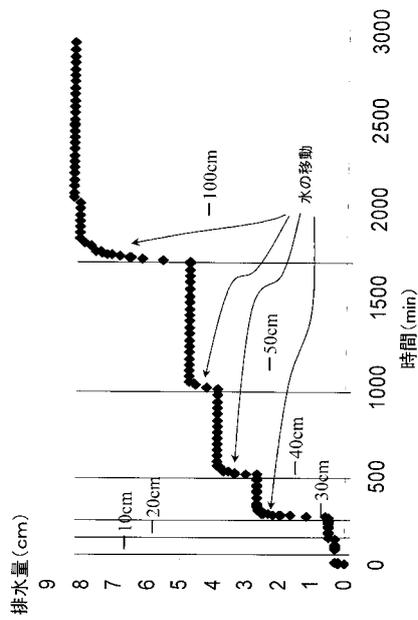
【図2】



【図3】



【図4】



【図5】

