

大型ライシメータ不飽和浸透実験 —パソコンによる計測制御およびデータ解析の効率化—

Experiment on water percolation in a lysimeter

- Computer aided automatic measurement and data analysis -

国立公害研究所 水質土壌環境部 大坪 国順 Kuninori OTSUBO
静岡大学 農学部 久保井 徹 Toru KUBOI

To investigate the unsaturated water percolation property, the soil temperature at more than ten levels was measured automatically. Warm/Cold pure water was applied on a lysimeter as an artificial rainfall once a week. The computer controlled system to measure the soil temperature and other physical parameters has been developed. Furthermore, the timesaving data analysis system, including file transmission between the terminal computer and host one, usage of a convenient computer graphic software, and so on, has been adopted. Comparing the measured time variations of soil temperature with the calculated ones given by a simple heat transfer model, the percolated depth of the rain water was evaluated.

Keywords : unsaturated percolation, soil temperature, lysimeter, heat transfer

1 序 論

地球規模の環境破壊に関する多くの報告は、水食や風食による表土流失や土壌表面への塩類集積から、回復が非常に困難な陸地の砂漠化・不毛化へと至る経路は想像以上に急激であると警告している。土壌荒廃を抑制する実学的研究が急務であることは論を待たないが、より効果的な抑制方法の開発には土壌の乾燥化や土壌表面への塩類集積のメカニズムを理解することが不可欠である。これらのメカニズムを考慮せずなされた安易な灌漑事業が世界各地で深刻な塩類集積を引き起こしている。著者らは、大型ライシメータを用いた不飽和浸透実験を継続しており、これまでに実質水分の移動速度や水分量分布の伝バン特性等ついて興味深い事実を報告してきた¹⁾。本研究の目的は、表土層での短期的な雨水浸透特性を、冷(温)水をトレーサーとして追跡する手法を検討することである。そのために、パソコン制御による各種物理量の自動モニターと測定データのオンライン画面表示を同時に行なうシステムを開発した。さらに、計測および計算データのファイル転送を含めた効率的なデータ解析システムを採用した。これらのシステムにより得られた土壌温度の時間変化に関する実験事実、数値実験結果から降雨の表土層での浸透特性を検討した。

2 実験内容および計測・処理システム

重水トレーサー実験では、土壌水をポーラスカップで採水する必要があるため、採水の間隔を10cm以下にはできず、最小時間間隔も1週間が限界である。また、種々の条件で重水トレーサー実験を行う場合、各実験条件で投入した重水が混ざり合わないことが必要である。そのためには、前回投入した重水が十分下方へ浸透した後でないと次の重水を投入できない。この“待ち”時間が大型ライシメータ実験では非常に長くなる。冷(温)水をトレーサーとすれば、温度センサーの間隔はcm単位で設置でき、測定時間間隔は秒単位に短縮できる。また、冷(温)水は、半日程度で完全にライシメータの制御温度に同化し、土壌には冷(温)水の影響は残留しない。そのため、短期間で次の実験条件に移行することができる。以上の理由により、表土層での短期的な雨水浸透特性を追跡するトレーサーとして冷(温)水を用いることを試みた。

2.1 実験の内容

毎週一回、決められた量の冷(温)水を降雨として与え、表土層を中心に深さの異なる13地点で土壌温度を、25cm間隔で電気抵抗を、さらにライシメータ最下層での累積浸透量を連続計測した。また、10cm、30cm、

55cm、80cm、105cm、130cmでのサクションを適当な時間
間隔で目視計測した。表-1に降雨条件、散水方法等を
まとめた。ライシメータは裸地条件で、土壌の性質につ
いては文献¹⁾を参照されたい。

2. 2 制御・解析システムの構成

計測の制御、及びデータの解析システムは以下の5つ
の構成要素からなる。

(1) サーモダック32 (データログ)

メモリ内蔵型で単体でも自動計測可能であり、計測
データのバッチ処理が可能。

(2) 外部コンピュータによる計測制御

RS-232Cを介してサーモダックをパソコン
によりMS-DOS環境下で制御させた。制御プロ
グラムに基づき、18chをスキャンし結果をフ
ロッピーディスク(FDD)へセーブ、という一
連の動作を2、3秒で実行する。

(3) 大型計算機との双方向ファイル転送

MS-DOSのTEXT FILE形式の計測データは大
型計算機へ定期的にファイル転送される。

(4) 大型計算機による処理、計算

数値シミュレーションや大容量のデータの
処理等は大型計算機で高速に実行させる。結
果はパソコン側へ逆ファイル転送する。

(5) 市販のアプリケーションソフトの活用

逆ファイル転送された実験データや数値計
算結果の整理・解析をパソコンを用い対話型
で行う。

図-1は今回採用した自動計測システム及
び解析システムの概要である。

2. 3 各システムの背景

各構成要素の採用の経緯、理由を説明する。

(1) サーモダック・・・多数の鉛直測定点で
の土壌温度、電気抵抗を昼夜連続モニターし、
デジタル量で記録させるために必要となる。

(2) 外部コンピュータによる計測制御・・・

1). 計測時刻(間隔)、スキャン回数を自由に設定するために必要。今回は人口降雨供給時にきめ細かく、
時間経過と共に計測間隔を長くした。2). 1週間分の計測データをFDDの中に1つのファイルとして収録する
ため。3). アイドリング時(計測実行時以外の時間)に計測データのリアルタイムトレンドグラフのディス
プレイを行う。このオンライン・モニターシステムは、以下の効果がある。(i). 結果がすぐ映し出される
ので、現象の理解に役立つ。(ii). 実験内容を見学者等に説明する際に説得力がある。図-2は測定結果の
オンラインディスプレイの一例である。実際には、各深さの結果は色分けして示される。

(3) 大型計算機との双方向ファイル転送・・・大量の電気信号データを物性値に高速に変換させたり、メッ
シュの細かい計算スキームシミュレーション等は、パソコンでは非常に時間がかかるか、不可能である。こ
れらの作業は大型計算機に行なわせ、結果の整理・解析は市販の対話型グラフ表示ツールを用いる。この種

表-1 実験条件

se- ries	Lysi. No.	Rain Wt. Temp. (°C)	GW.L. (cm)	Qr (l) [cm/cm ²]	Tr (hr)	N (times /w)	Water- ing Proc.
A	#4	5	225	130	0.05	1	bucket
		22		[5.73]	0.05		wt.pot
		5			0.05		bucket
		22		85	0.05		wt.pot
		50		[2.87]	0.05		bucket
					0.05		wt.pot

Rain Wt.Temp.: Temperature of the artificial rainfalls;
GW.L.: Groundwater level from the soil surface;
Qr: Amount of artificial rainfall in litter or [cm/cm²];
Tr: Duration hours of the artificial rainfalls; and
N: Number of times of the artificial rainfall in a week.

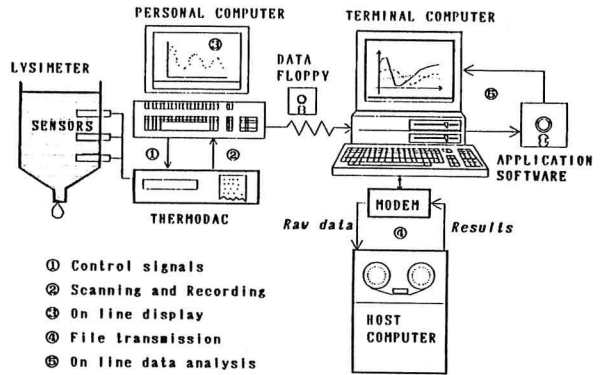


図-1 自動計測及びデータ解析システムの説明図

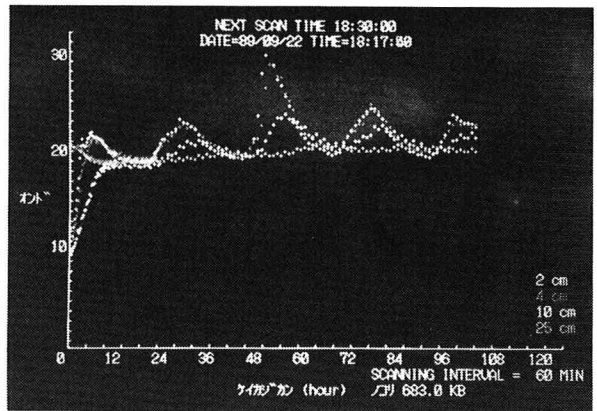


図-2 オンラインディスプレイの一例

のツールは種々のグラフ表示が手軽にかつ短時間で出来るため、データ解析の効率化が図れ、かつ斬新な発想につながる。この解析システムでは、パソコンと大型計算機の間での双方向のフィル転送が不可欠である。さらに、他の研究者とのデータの共有を図るためにも、大型計算機システムに保管することが望まれる。

(4) MS-DOSによる動作・・・第一に、大型計算機端末機(HITAC T-560/20)のエミュレータ(EM560PC)のオペレーティング・システムがMS-DOSであるためである。第二に、大型計算機とモデムを専用回線をつなぎ、エミュレーションソフトを用いることにより、大型計算機ですぐ利用できる形式で、大量の測定データを実験室もしくは研究室のMS-DOSパソコンから大型計算機のデータセットに短時間で転送できる(ボーレート・・・9600BPS)。また、双方向のファイル転送が非常に簡単で、メニュー形式のコマンド操作一回で済む。音響カプラーを使う方法は、公衆回線で転送できるが、時間がかかる(ボーレート・・・300BPS)上に回線上のトラブルが生じ易い。さらに、レコード長に制限があり、データを大型計算機で利用するためには専用のソフトウェアが必要(通常は自作)となる。また、転送中やと接続中は電話が使えないことも不便である。

(5) アスキー形式(テキストファイル)のデータ・・・以下の利点がある。まず、測定データや計算結果の編集、解析に市販のソフトやツールが使えること。次に、他の機器とのデータ交換が簡単であること、最後に、将来的には、パソコン通信等を利用して、研究者間でデータや成果のやり取りが可能であることである。

3 結果及び考察

図-3は、同じ降雨条件($Q_r=130l$ 、 $5^\circ C$)における5回分のサクシジョンの実測値を比較したものである。降雨後3時間までは、同じ降雨条件でも週によって水分量伝パン速度に若干変動が見られることがわかる。図-4は散水温度がサクシジョンの時間変化に及ぼす影響を見たものである($Q_r=130l$ 、 $T_r=0.05hr$)。65lの場合²⁾と同様、散水温度は10cm以深でのサクシジョンの伝パン特性に殆ど影響を与えていない。Philip & de Vries(1957)³⁾は、土壌層内の水分移動方程式を式(1)で与えた。

$$\partial \theta / \partial t = \nabla \cdot (D_r \nabla T) + \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \partial K / \partial z \quad (1)$$

ここで、 t : 時間、 z : 鉛直軸(上向きが正)、 T : 土壌温度、 D_r : thermal moisture diffusivity、 D_θ : isothermal moisture diffusivity、 K : 不飽和透水係数である。Philipらは各項のオーダー比較により高含水状態では温度勾配の影響は無視できるとした。ライシメータの水分状態は、 θ では降雨直前でも約0.3、降雨後で0.75、飽和度 S_r ではそれぞれ75%と95%であり、十分に高含水比状態にある。図-4の結果はPhilipらの考察と合致している。この程度の冷水、温水であれば浸透特性実験に殆ど悪影響を及ぼさないと結論される。但し、 $50^\circ C$ と $5^\circ C$ では動粘性係数の違いからか、冠水面が消滅するまでの時間は多少前者の方が早かった。

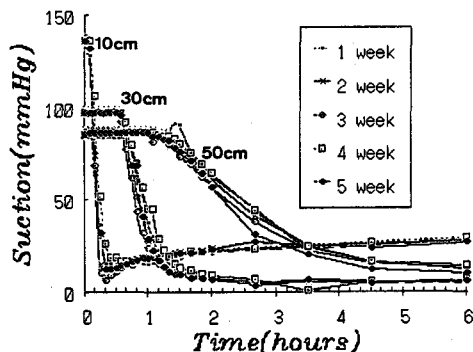


図-3 サクシジョンの時間変化

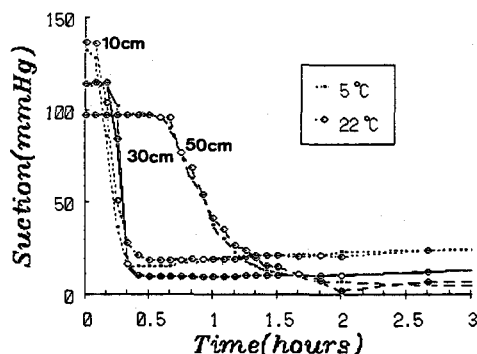


図-4 サクシジョンの時間変化(降雨温度の影響)

図-5は $Q_r=65l(2.87cm/cm^2, 50^\circ C)$ と $130l(5.73cm/cm^2, 2.5^\circ C)$ の場合の各層の土壌温度の時間変化の実測値である。図-5から次のことが言える。1). 冷(温)水の影響はせいぜい数時間である。2). 上層から順に地上温度の日周変動の影響を受ける。3). 40cm層ではトレーサー水の温度や地上温度の影響はない。

図-6は降雨から1日以降の土壌温度変化の計算値と実測値を比較した一例である。計算値は、地表面で

の温度を境界条件として与え下層へは熱伝導のみで伝わるとして求めた。降雨から一日以降は、各層での温度は地表面の温度の熱伝導現象で説明できることがわかる。計算の際必要となる土壌中の熱伝導度係数 λ の値については文献²⁾に詳しい。結論としては $Q_r = 130\text{l}$ の場合も 65l の場合と同様に、 $\lambda = 12.5\text{cm}^2/\text{hr}$ で定常とした計算で充分であることがわかった。

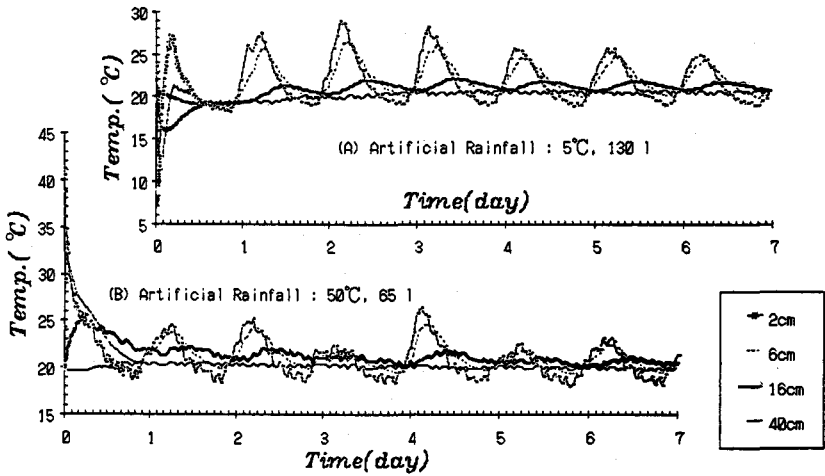


図-5 各層の土壌温度の時間変化の一例 ((A): 5°C、130 l の降雨、(B): 50°C、65 l の降雨)

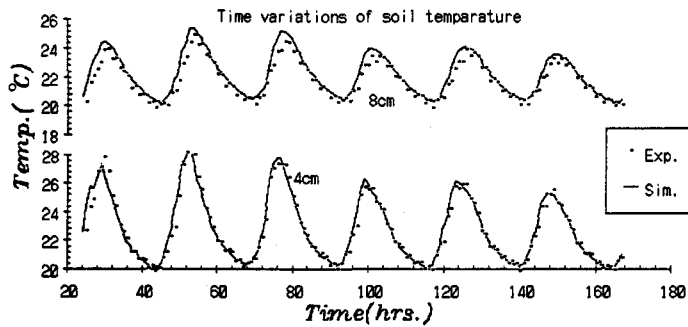


図-6 土壌温度の時間変化の計算値 (B.C.: 0 cm deep、 $K = 12.5\text{ cm}^2/\text{h}$) と実測値の比較

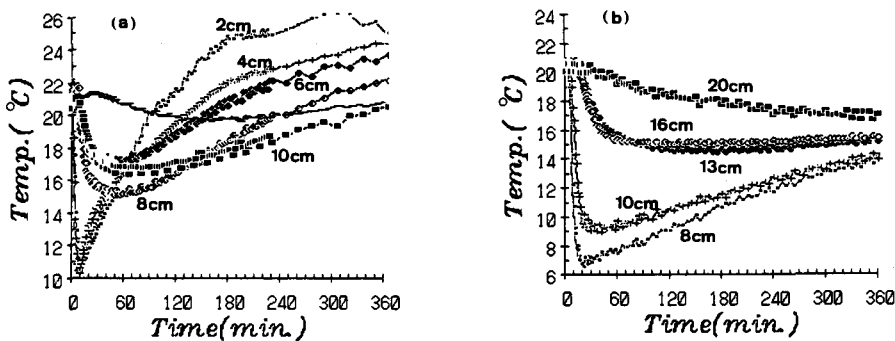


図-7 実測された土壌温度の時間変化 (降雨後6時間後まで)

図-7は各層の降雨後6時間までの土壌温度変化の実測値である。図-7(a)より、 $Q_r = 65\text{l}$ の場合、冷水による温度低下は2cm層より4cm層で、さらに6cm層より8cm層で早いことがわかる。 $Q_r = 130\text{l}$ の場合、これら

の層以外にも、図-7(b)が示すように13cm層より16cm層でわずかに早く温度低下が現われた。浅い層より深い層でより早い土壌温度低下が現われるという応答の逆転現象は、熱伝導だけでは説明できない結果であり、またセンサーが同一鉛直線上に設置されてないために観測された。これらの実測結果は雨水の鉛直浸透が平面上で一様でないことを物語っている。

de Vries(1958)⁴⁾は、Philip & de Vriesの土壌内の温度変化の支配方程式を一般化して式(2)で与えた。

$$[C + L(S - \theta_1)h\beta](\partial T/\partial t) + [(L\rho_1 D_{\theta v}/\alpha \nu D_{atm}) - L\rho_v + \rho_1 W](\partial \theta_1/\partial t) = \nabla(\lambda \nabla T) + L\rho_1 \nabla(D_{\theta v} \nabla \theta_1) + c_1 q_1 \nabla T \quad (2)$$

ここで、C: volumetric heat capacity of soil、L: 気化熱、S: porosity、 θ_1 : volumetric liquid content、h: 相対湿度、 $\beta = d\rho_v/dT$ 、 ρ_1 : 水の密度、 ρ_v : 水蒸気の密度、 ρ_a : 飽和水蒸気の密度、 $D_{\theta v}$: isothermal vapor diffusivity、 α : tortuosity factor、 ν : mass flow factor、 D_{atm} : 水蒸気の分子拡散係数、W: 浸漬熱、 λ : 土壌の熱伝導係数、 c_1 : 水の比熱、 q_1 : liquid fluxである。両論文とも、高水分状態では熱伝導と水分移動に伴う熱移動が支配因子となる言及した。この場合式(2)は式(3)と簡略化される。

$$C(\partial T/\partial t) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - c_1 q_1 \nabla T \quad (3)$$

方程式(1),(3)を連立させて解けば、今回の実験値 $T(z, t)$ と $\theta(z, t)$ が再現されるはずである。しかし、計算結果の信頼性は各種パラメーターの正確な同定に帰着され、現実問題としてパラメータの評価が非常に難しい。今回の実験は、パラメータの同定は現象の正しい理解がなくては有り得ないと云う観点に立って、不飽和浸透において水分フラックス q_1 や浸透深さがどの程度のものかを把握することを目的としている。即ち、土壌温度変化を数値計算により厳密に再現しようとするのではなく、視点を変えて、熱伝導モデルで得られる土壌温度変化と実験値とのずれから q_1 や浸透深さの特性を探ろうというものである。両者のずれがないところは雨水の浸透がなかったと考え、ずれが大きい地点では雨水の浸透があったと考えて、雨水の実際の浸透範囲を推定しようというものである。この観点から見ると、図-6は、降雨から1日以降では式(3)の左辺第二項は現象に殆ど影響を及ぼさないこと、即ち、 q_1 が小さいことを示している。

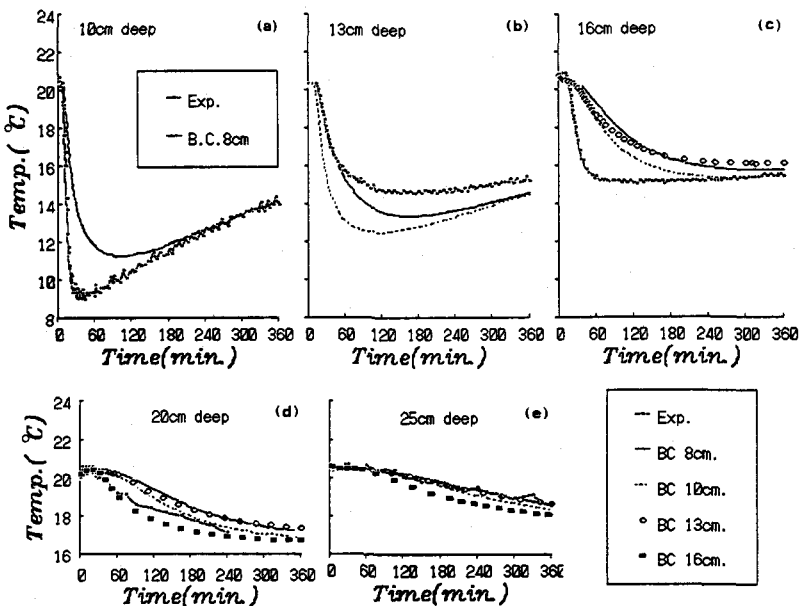


図-8 各層での土壌温度変化の実測値と境界条件の位置が異なる数値計算の結果

図-8の一連の図は、ある層での土壌変化データを境界条件として、それより深い層での土壌温度変化が伝導のみで起こるとして計算した結果とその地点での実測値を比較したものである。降雨条件は $Q_r = 130l$ 、 $T_r = 0.05hrs$ で $5^\circ C$ である。 $Q_r = 130l$ の場合、間隙比を2.7、飽和度を100%として、降雨の浸透深さを単純計算

すると約8cmとなるので、8cm未満を境界条件とするのは意味がない。図-8-(a)から(e)は、順に10cm、13cm、16cm、20cm、25cmでの土壌温度の実測値とそれより上層の実測値を境界条件とした計算値を示す。(a)の10cmでは、8cmの実測データを境界条件とした熱伝導のみでは温度低下が説明できない。この地点では10cmまでは雨水が浸透してきたと推測される。(b)の13cmでは、8cmと10cmの実測データを境界条件とすると、熱伝導だけ考えても温度低下が過大となる。特に10cmを境界条件とした場合実測値とのずれが大きい。この地点の上部では冷水は8cmも浸透していないと考えられる。(c)の16cmでは、どの境界条件でも実測の温度低下を説明できない。この地点では冷水は16cmまでは浸透したと考えられる。(d)の20cmでは、どの境界条件でもおおむね実測値と一致するが、16cmの実測データを境界条件とした場合、少し過大評価となる事が多かった。この地点の温度変化は8cm層からの熱伝導で十分説明がつく。(e)の25cmでも、20cmの場合と同様なことが言え、8cm層からの熱伝導のみで十分説明できる。(d)、(e)から、冷水は20cm層までは浸透してきていないと結論できる。(a)から(e)までの考察から、降雨の鉛直浸透は均一ではなく、 $Q_r=130l$ の場合は場所により8~16cmの範囲で浸透したと考えられる。同様の考察から、 $Q_r=65l$ の場合には4~8cm程度浸透すると考えられる²⁾。

図-9は、降雨継続時間 T_r がサクシオンに及ぼす影響を $Q_r=65l$ 、 $50^\circ C$ の降雨条件で検討した結果である。30cm層まで明らかに T_r の影響が認められる。図-10は、 T_r が土壌温度の時間変化に及ぼす影響を図-9と同じ降雨条件で見た結果である。 T_r の影響は10数cmまでしか認められなかった。 $5^\circ C$ の場合も図-9、図-10と同様な結果が得られている。 T_r が異なっても降雨の浸透深さは10cm程度で大きく変わらないのに比して、水分量の伝搬特性は浸透深さより2、3倍深くまで影響を受けることがわかる。

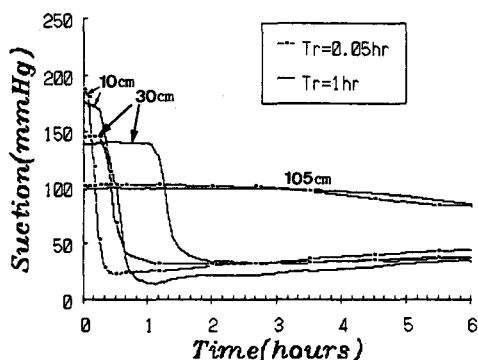


図-9 T_r がサクシオンの時間変化に及ぼす影響

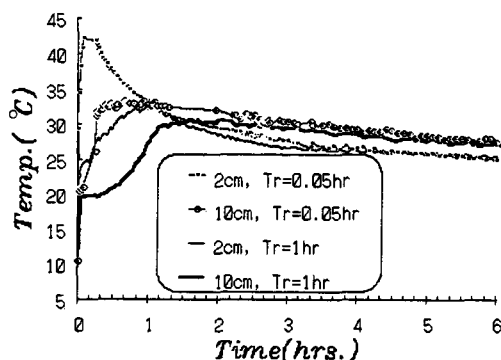


図-10 T_r が土壌温度の時間変化に及ぼす影響

4 結 論

- (1) パソコン制御による各種物理量の自動モニター、オンライン画面表示システム及び効率的なデータ解析システムを構築した。
- (2) 上記システムを用いて得られた実験データと数値実験結果を比較検討した結果、1回の降雨では、その雨量が飽和度100%の条件で土壌中を占める深さより平均的に2~3cm程度(場所により2倍程度)深くまで浸透し、それ以降はほとんど下方へ移動しない、と結論付けられる。

なお、計測制御プログラムについては国立公害研究所主任研究員 乙間末広氏より提供頂いたものを改良して用いた。また、画面表示プログラム作成には宮本典之氏の協力を得た。両氏に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 大坪国順(1988): 大型ライミータにおける不飽和土壌中の水分の鉛直移動特性、第32回水講、pp.107-106.
- 2) 大坪国順・久保井徹(1989): 土壌温度をトレーサーとした土壌水分移動の追跡、第33回水講、pp.235-240.
- 3) J.R. Philip and D.A. de Vries(1957): Moisture movement in porous Materials under Temperature Gradients, Transactions, American Geophysical Union, Vol.38, No.2, pp.222-232.
- 4) D.A. de Vries(1958): Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media, Transactions, American Geophysical Union, Vol.39, No.5, pp.909-916.