

野外実験土槽における観測結果 (1980年4~7月)

—降雨浸透時の砂槽地中熱環境変化—

Observations in the Lysimeter (April-July, 1980) —Changes of Subsurface Thermal Regime in Sand Soil during Infiltration—

佐倉 保夫*・開発 一郎**

Yasuo SAKURA and Ichiro KAIHOTSU

I まえがき

表層地中温度は、降水の流入によって比較的短期間のうちに大きな変化を生じることが観測されている (Wierenga et al, 1970; 佐倉, 1979)。この事実は表層地温形成のメカニズムを探求するとき、あるいは地表面の熱収支を検討する場合に重要な問題であると考えられる。

このような不飽和土中における水と熱の輸送機構を解明することを目的に、すでに作成した野外土槽 (佐倉・開発, 1980 a; 1980 b) を用いて、1980年4月から7月初旬までの間、降雨時を対象とした観測を行なった。地中熱環境の変化に関して関東ローム土槽では、水理実験センター圃場での観測 (佐倉, 1979) と同様な結果を得たが、砂槽と比較すると地温変化が小さくかつ応答が緩慢なために、地温の変化から土壌水の流動状況を直接検知するのは困難であった。そこで、本研究では、主として砂槽において降雨浸透水がもたらした地中熱環境の変化についての検討を試みた。

II 観測の方法および結果

1) 観測方法

測定項目は、降水量・圧力水頭・土壌水分量・地中温度・地下水流出量であり、観測の方法は佐倉・開発 (1980 b) に従った。なお、降水量・地

中温度・地下水流出量は1時間毎に記録紙から読み取った値を、水分量・圧力水頭については降雨時の変化が激しいときには1~2時間毎、その前後の変化が穏やかな時には1日に1~2回程度の間隔で測定した値を使用した。

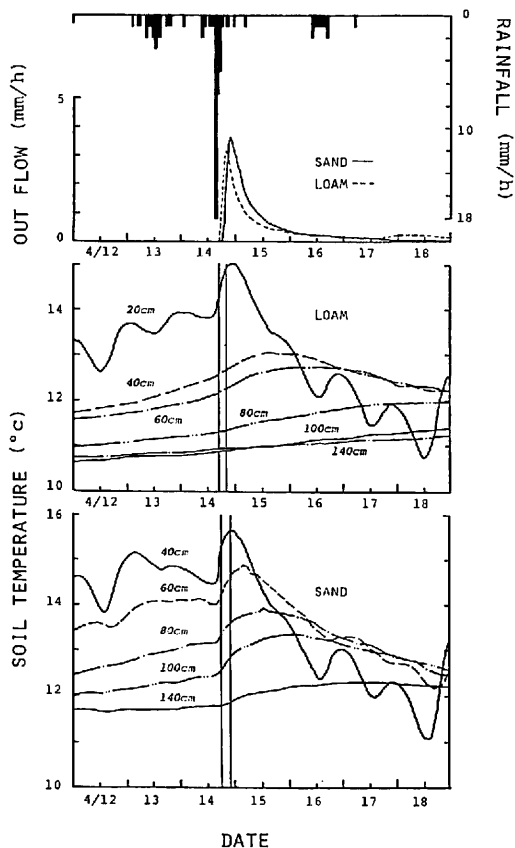
野外実験土槽に詰めた関東ロームと砂の物理特性、水分特性については開発・佐倉 (1981) を参照されたい。

2) 観測結果

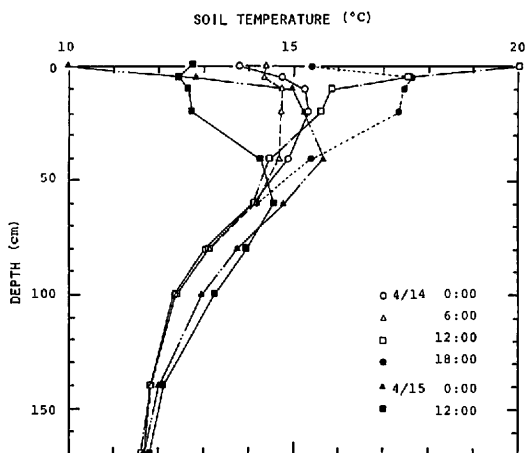
1980年4月12日~18日 4月13日、14日の19mm, 40mmの降雨を観測対象とした。この以前には、3月29日、30日、4月1日、9日にそれぞれ、10, 40, 10, 1mmの降雨があった。

同期間の降水量・地下水流出量・地中温度の変化を第1図に示す。4月13日の降雨以前でもわずかに砂、ローム土の両槽からの地下水流出は認められた。4月14日15~16時のピーク時間雨量18mmに対応して、ローム土槽では17時、砂槽では18時30分頃地下水流出量の急激な増加が始まり、そのピーク時刻はそれぞれ19~20時、21~22時であった。第1図から明らかなように、砂槽地温はローム土槽のそれに比べて降水の流入による影響を強く受けている。とくに、砂槽の地下水面 (地下約145cmに設定) 付近の140cm地温は、地下水流出に対応してその開始時に上昇が始まり、ピーク時に温度上昇率が最大となっている様子が見られる。

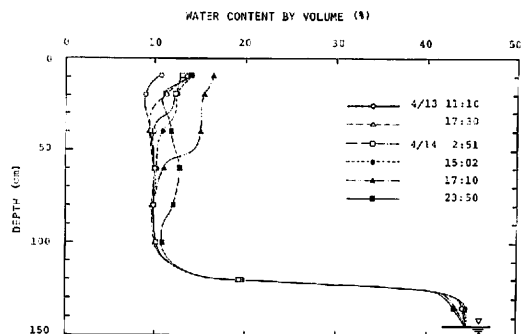
* 水理実験センター **地球科学系



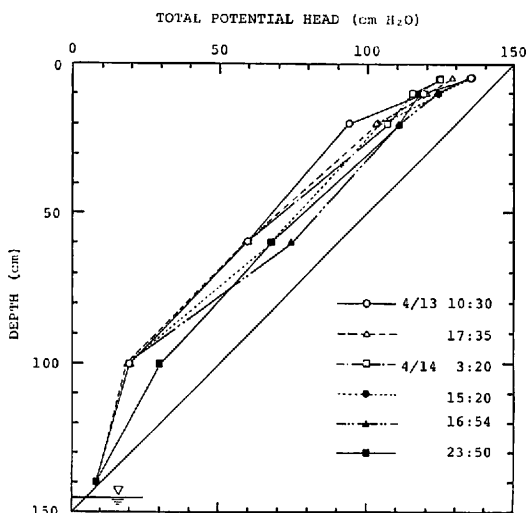
第1図 降水量・地下水流出量および地温の観測結果（地温変化中の2本の縦線は地下水流出開始およびピーク時を示す）



第2図 砂槽地温プロフィール



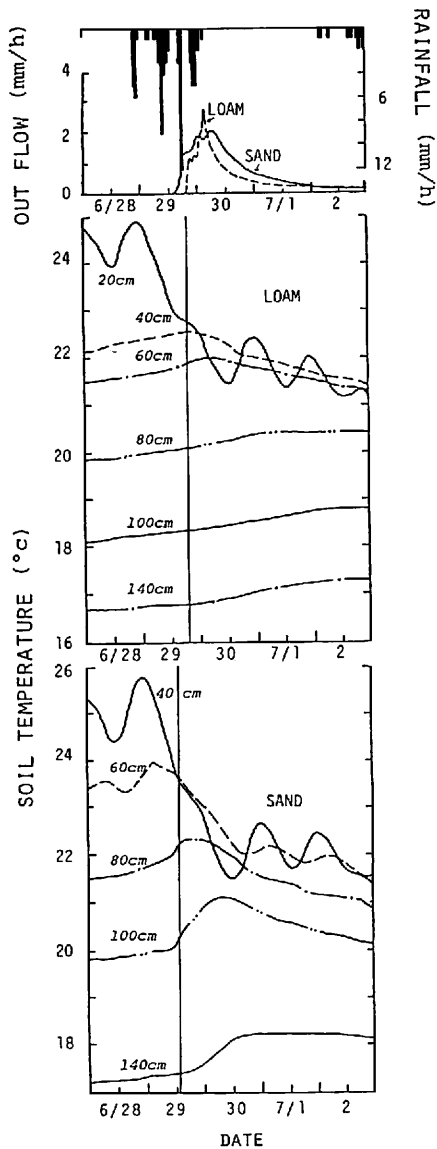
第3図 砂槽土壌水分量プロフィール



第4図 砂槽全水頭プロフィール

た。なお、砂槽地温プロフィールのこの間の変化は第2図である。水分量、圧力水頭も同時に測定しており、地下水流出に至るまでの水分量および地下150cmを基準として求めた全水頭のプロファイルの変化を第3、4図に示した。降水の流入による水分量と圧力水頭への影響が地下100cmにまで及んだ時に地下水流出の開始することが推測された。また、この間地下水面付近では、圧力水頭に変化はみられないが、水分量は地下水流出が開始する直前にわずかに減少し、流出の減衰ともななって元に回復するような特異な変動が認められた。この現象は後述する観測期間でもほとんど同様に観測された。

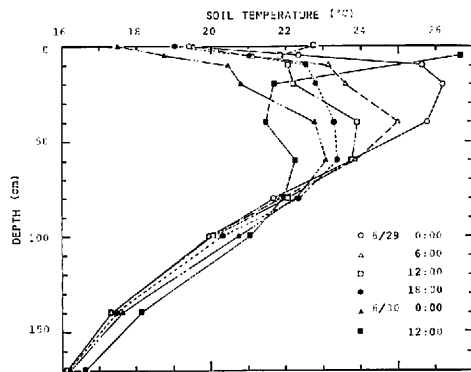
6月28日～7月2日 6月初・中旬の降水量は



第5図 降水量・地下水流出量および地温の観測結果（地温変化中の縦線は地下水流出開始時刻を示す）

比較的少なく、6月2日に13mm、8、9日に3、16mm、20、21日にそれぞれ3、10mmであった。その後、26日に4mm、28、29、30日に、12、52、3mmの降雨があり、この6月末の降雨を観測の対象とした。降水量が少なかった6月中も砂槽ではわずかながら地下水流出は持続する

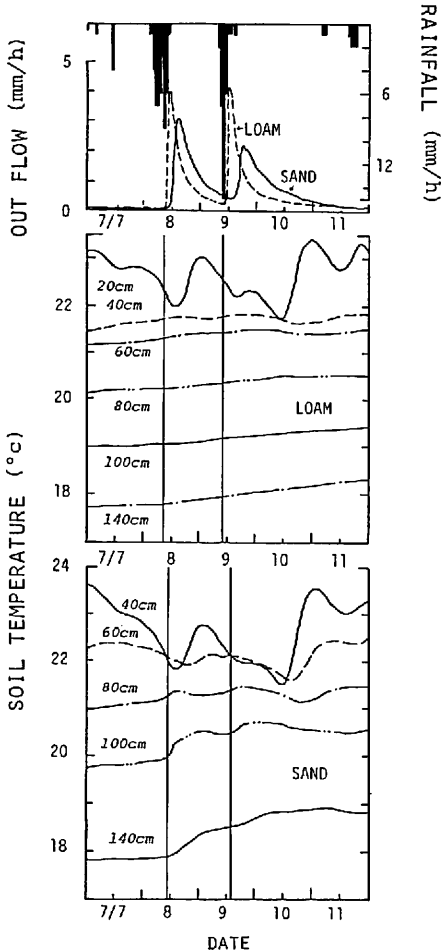
RAINFALL (mm/h)



第6図 砂槽地温プロファイル

が、ローム土槽では22日と28日の両日のみ完全に流出は停止した。この間の降水量・地下水流出量・地中温度は第5図である。29日7～13時の22mmの降雨にともなって、先に砂槽からの地下水流出の急増が14時30分に始まる。つづいて17～18時の15mmの降雨の後、完全に流出を停止していたローム土槽からの流出が再開する。流出のピークは砂槽で6月29日23時～30日1時に、ローム土槽では30日2～3時に発生した。ところで、砂槽からの流出開始がローム土槽に先立つ場合を野外実験土槽での観測開始以来現在に至るまで数例観測しているが、このような現象が認められるのは流出を発生させる降雨時以前にローム土槽の流出が停止しているときに限定されている。一方、地中温度の変化は、すでに述べた4月の場合と同様であるが、この時期には地下80cm以深で大きな温度勾配が形成されているため、土壤水の流動に起因する地温変化がより深部にまで大きく及んでいる。砂槽地温プロファイルの変化は第6図に示した。

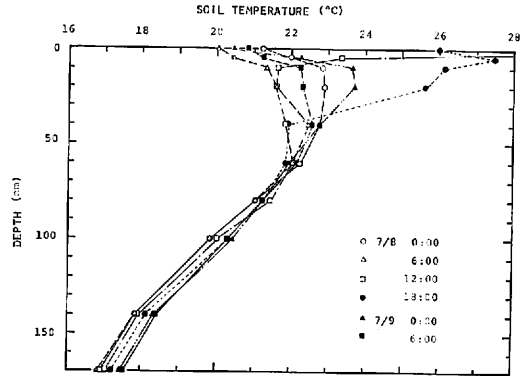
7月7日～11日 6月末の降雨以後地下水流出の継続していた時期に、7月2、3日にそれぞれ14、6mm、7日に5mmの降雨があり、8日に44mm、9日に33mmと2つの孤立したピークを持つ降雨が発生したことに由来して、地下水流出にも2つのピークが出現した。第7図に降水量・地下水流出量・地中温度を示す。7月8日



第7図 降水量・地下水流出量および地温の観測結果（地温変化中の縦線は地下水流出開始時刻を示す）

2～11時の44mmの降雨に呼応して、地下水流出増加はローム土槽で9時、砂槽で11時に始まり、直後の11～12時、14～15時にそれぞれそのピークが観測された。その後地下水流出は減少するが、9日8～15時に33mmの降雨がさらに付け加わると、再び地下水流出は砂槽で14時に急増し、そのピークは17～18時であった。なお、ローム土槽では7月9日5～11時の間、流量計の故障により欠測するが、前後の関係から、地下水流出の開始は10時、そのピークは12時頃と推定した。一方、地中温度に関しては、2つの降雨ピークの影響がローム土槽では60cmで浅でわずかに現われる程度で

RAINFALL (mm/h)



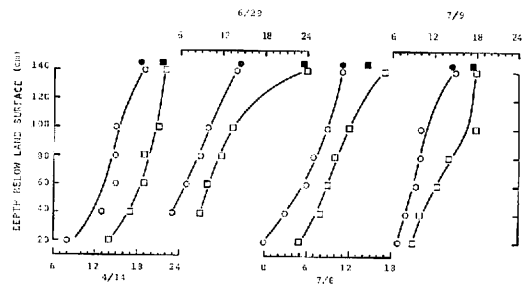
第8図 砂槽地温プロファイル

あり、それ以深では温度上昇傾向は認められるもののその効果を分離することは困難であった。砂槽ではその影響は顕著であり、2回目より1回目の降水の方が温度変化は大きい。1回目の降雨時における砂槽地温プロファイルの変化を第8図に示した。

III 観測結果の考察

1) 土壌水の移動と地中温度変化

第1、5、7図に示した砂槽地温変化は、降水の流入そして土壌水の流動状況を克明に反映していた。そこで、それらの関係をより明確にすることを目的に、深度別の地温変化開始時刻とその変化率最大時刻を地温の時間微分 (dT/dt) の数値計算から決定した。観測した降雨・地下水流出の状況および砂槽地下140cmでの dT/dt に変化を



第9図 砂槽地温の変化開始時刻(O)と同変化率最大時刻(□)の移動(●は地下水流出開始時刻、■は同ピーク時刻を示す)

第1表 降雨・地下水流出および砂槽地温(140cm)の関係

観測期間	降雨期間	総降水量	最大降雨強度	同時刻	地下水流出開始時刻				同ピーク時刻		砂槽地温(140cm)の変化			
					ローム		砂槽		ローム		砂槽		開始時刻	最大時刻
					土	槽	土	槽	土	槽	土	槽		
1980 4/12~18	4/13 4/15 2時~5時	60mm	18mm	4/14 15~16時	4/14 17時	4/14 18時30分	4/14 19時	4/14 19時	4/14 19時	4/14 19時	4/14 22時			
6/28~7/2	6/28 6/30 21時~3時	77mm	12mm	6/29 17~18時	6/29 19時	6/29 14時30分	6/30 2~3時	6/29 6/30 23~1時	6/29 14時	6/29 14時	6/30 0時			
7/2~11	7/8 7/8 2時~11時	44mm	9mm	7/8 8~9時	7/8 9時	7/8 11時	7/8 11~12時	7/8 14~15時	7/8 11時	7/8 11時	7/8 17時			
	7/9 7/9 7時~15時	33mm	15mm	7/9 9~10時	7/9* 10時	7/9 14時30分	7/9* 12時	7/9 17~18時	7/9 15時	7/9 15時	7/9 18時			

(* 推定時刻)

生じた時刻の関係をまとめたのが第1表であり、第9図には深度と地温変化開始時刻、同変率最大時刻の関係を示した。

地表面下数10cmまでは、気温日変化の効果が著しく、降水の流入による地温変化のみを分離し検出することは難しい場合が多い。そこで、地温変化が明白な深度でその時刻を決定して、つぎに、浅層ではそれ以前に変化していると仮定して、計算した dT/dt の時系列変化から時刻を推定した。その結果、地温に変化が生じた時刻を深さ方向に追跡すると、地下140cmではすべての場合地下水流出の急増する時刻とほぼ一致し、地温変化率最大時刻では1つの例外を除いて地下水流出のピーク時刻におおむね良い一致をみた。ちなみに第9図から地下80~140cm間の地温変化開始時刻の差は4~5時間であり、従ってその移動速度は $3.3 \sim 4.2 \times 10^{-2}$ cm/secとなる。この値は定水頭法で得た砂の飽和透水係数 2.4×10^{-2} cm/secより大きい。この事実は、第3、4図の水分量・全水頭プロフィールの変化から推察される土壌水の流動機構と符合している。すなわち、降水の浸透により地下100cmまでの懸垂水帯の水分量が最小容水量(約10%)を越えると浸潤前線が形成される。さらに降雨が継続すると重力水の下方移動をうながし浸潤前線は下降する。地下100cmの毛管水帯上端に浸潤前線が到達すると毛管水帯の圧力平衡がくずれて直ちに地下水流出を開始させる。勿論、ダルシー流速と実流速の差も考慮する必要はある

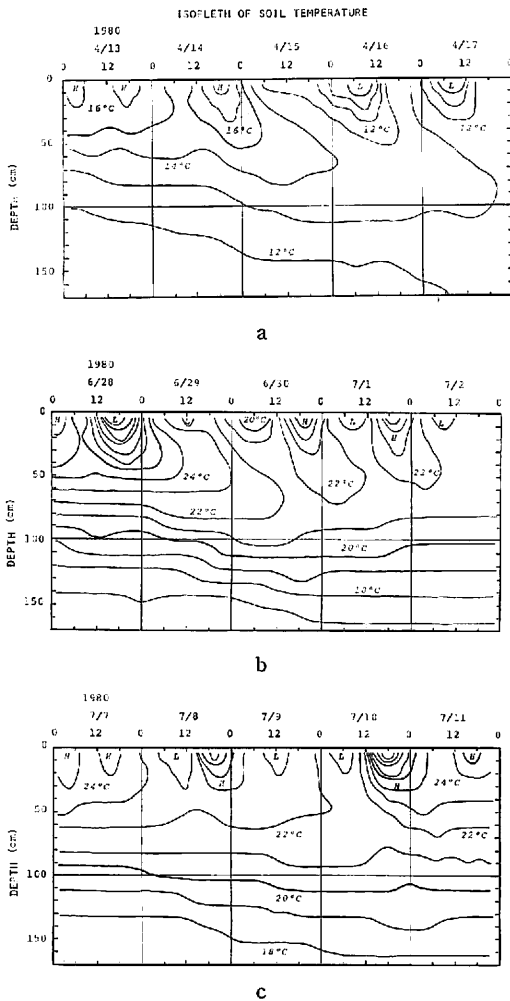
うが、このような土壌水の流動機構を忠実に反映した結果、地温変化開始時刻から推定される地温変化の伝播速度が飽和透水係数より大きな値となったのではないかと考えられる。

また、第3図で、地下水面付近で認められた水分量の特異な変化も、毛管水帯において毛管力と水圧との間の平衡がくずれたことに由来する現象であると考えられるが、いずれにせよ毛管水帯での水分移動が地温変化の伝播速度を支配していると言えそうである。

2) 砂槽地中貯熱変化量の推定

降水の流入が地中熱環境にどのような変化を生じさせたかを概観するため、各観測期間中の砂槽地温のアイソプレスを作成した。第10図に示す。4月~7月は地温の上昇期であり、そのような季節変化に日変化が合わさった熱環境に、降水の浸入の効果がさらに付加された様子がこれらの図から理解される。そして、地温の季節変化の影響は地下100cm以深で、日変化は地表面下数10cm以浅の範囲で明瞭に認められる。一方、降水の流入は、地下100cm以浅では地温の日変化を乱して、降雨の後1~3日間その影響を残すが、地下100cm以深では季節的な地温上昇傾向をさらに加速させる効果として作用する。そこで、降水の浸透に由来する地中熱環境変化の過程を、地温および水分量の測定値から計算により推定することを考えた。

土壌水の移動を考慮した一次元の熱量保存則か



第10図 砂槽地温アイソプレス

ら次式が導ける (Suzuki, 1962; Stallman, 1965),

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - c_0\rho_0 \frac{\partial(vT)}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 T は温度($^{\circ}\text{C}$)、 t 、 z は時間(sec)および鉛直方向の座標軸(cm)、 v は浸透流速(cm/sec)、 $c\rho$ 、 $c_0\rho_0$ は水を含む土壌および水の体積熱容量($\text{cal}/\text{cm}^3/^{\circ}\text{C}$)、 K は水を含む土壌の熱伝導率($\text{cal}/\text{cm}/\text{sec}/^{\circ}\text{C}$)である。従って、(1)式は、地中の貯熱量の変化が熱伝導によるものと土壌水の流動による移流熱量の変化の和であることを意味している。また、土壌の体積熱容量は水分量の関

数として次式で示される。

$$c\rho = \text{水分量} \times 1.0 + \text{固相率} \times 0.5 \quad (2)$$

前述した深度別 dT/dt の値と(2)式の体積熱容量の積は、(1)式から、ある深度におけるある時刻の地中貯熱変化量となる。

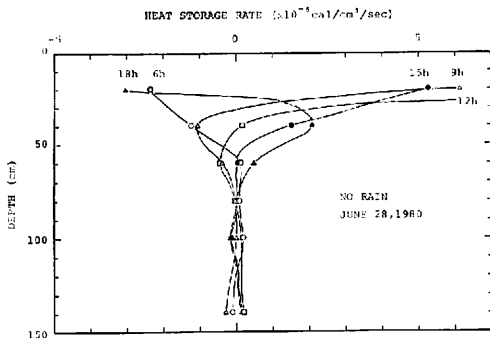
このようにして求めた砂槽地中貯熱変化量プロファイルが第11図である。ある時刻のプロファイルを地表面から貯熱変化が無くなる深度まで積分すると、その時刻に地表面を通過した熱量、すなわち地中熱流量となることが理解されよう。

第11-a図は、6月28日の6~18時の3時間毎の地中貯熱変化プロファイルである。この時期は前章でも述べたように降水量が少なく土壌は比較的乾燥状態であった。従って無降雨時の一般的な地中貯熱量の日変化の様子を示していると考えられる。この図によれば、地下100cm以深でも多少の変化は認められるが、測定精度を考慮するとほとんど無視できるオーダーであり、一応の日安として地下40~60cmまでが日変化の出現する範囲であると言える。

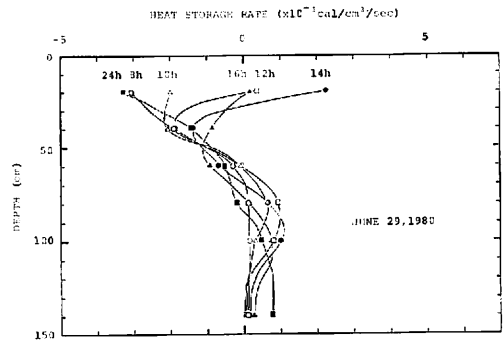
第11-b, c, d図は4月14日、6月29日、7月8日の貯熱変化プロファイルである。降雨のピークに対応して流入した浸透水が流動して、地下水流出を発生させるまでの変化の過程を示している。

4月14日の場合では、降雨のピーク時が15~16時であるため、地表面下数10cmまでの温度勾配が最大の時(第2図)に浸透水がこの領域を通過したことになる。すなわち、4月14日12時には地表面温度の上昇によって地下40cmまで貯熱量の増加がみられ、その後のピーク降雨によって発生した浸透水の流動が、さらに下方へ熱を輸送した。地下20cmでは18時に貯熱変化が停止し、以後地表面の冷却にともない熱流の方向は逆に上向きとなるが、この間も地下50cm以深では浸透流による下方への熱輸送は継続していることが理解されよう。

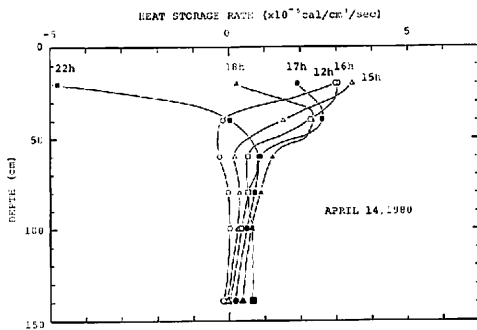
6月29日、7月8日では、浸透流速を最大にする降雨のピーク発生時が、それぞれ17~18時、8~9時であった。ところがそれらの時刻は、第6、8図の地温プロファイルによれば、地表面と



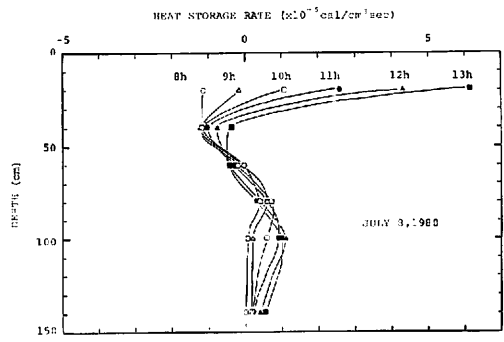
a



c



b



d

第11図 砂槽地中貯熱変化量のプロファイル

地下数10cmの間で温度勾配が小さくしかもそれ以下に深の勾配とは逆に地表面で温度が低い熱環境であったため、地下40cmでは常に負の貯熱量変化を示した。一方、地下100cm以深の貯熱変化量プロファイルは、土壤水の移動に伴って正の方向に、そして下方へと推移する。

従って、強雨時の地中貯熱変化プロファイルは前述したように懸垂水帯では浸潤前線の移動を克明に伝え、毛管水帯では特異な土壤水の流動状況を反映していると考えられる。

IV あとがき

降水の流入に起因する地中熱環境の変化に焦点を合わせ、野外実験土槽を用いた一連の観測を行なった結果、砂槽においてつぎのことが明らかになった。

土壤水分量と地温の深度別測定値にもとづいて計算した地中貯熱変化量プロファイルによれば、

無降雨時には地表面温度の日変化の影響範囲が地下数10cm以浅であるのに対して、数10mmにおよぶ降雨が発生すると、それにより生じた土壤水の移動は、地表面で出入りする地中熱流量を短時間のうちに下方へ伝え、季節変化で形成された温度勾配に支配される熱流をさらに下方へ輸送する。

降雨時の地温変化は、水分量および圧力水頭の観測から推測された土壤水の流動機構を克明に反映している。すなわち、降水の浸透にともなう地温変化の伝播速度の値は、地下80~140cmで $3.3 \sim 4.2 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ と飽和透水係数 ($2.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$) より大きく、この現象を理解するためには、毛管水帯での圧力平衡のくずれに起因する土壤水の動きを考慮した流動機構を考える必要がある。

関東ローム土は砂土と比較して、その物理特性の故に降雨時の地温変化が小さくかつ応答が緩慢であるため、ローム土槽中の熱環境変化には言及しなかった。しかし、温度の測定精度を向上させ

るとともに、水分量・圧力水頭の連続計測が実現できれば、ローム土についても砂土と同様な研究は可能となる。

土壌中の水と熱の同時輸送に関する諸問題の定量化を推進させるには、上述した計測技術の開発が不可欠であり、今後の課題であると考えられる。

最後に、野外実験土槽での観測を継続する上で、種々の協力をいただいた小島盛技官に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 佐倉保夫 (1979) : 浸透過程の地中温度変化から推察される土壌水分移動について. 筑波大学水理実験センター報告, 3, 33—38.
- 佐倉保夫・開発一郎 (1980 a) : 野外土槽における観測システムについて. 筑波大学水理実験センター報告, 4, 89—92.
- 佐倉保夫・開発一郎 (1980 b) : 野外土槽における雨水の鉛直移動. 筑波大学水理実験センター報告, 4, 25—29.
- 開発一郎・佐倉保夫 (1981) : 野外土槽中の不飽和土の水分特性. 筑波大学水理実験センター報告, 5, 19—23.
- Stallman, R. W. (1965) : Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 70, 2821—2827.
- Suzuki, S. (1960) : Percolation measurements based on heat flow through soil with special reference to paddy fields. *J. Geophys. Res.*, 65, 2883—2885.
- Wierenga, P. J., Hagan, R. M. and Nielsen, D.R. (1970) : Soil temperature profiles during infiltration and redistribution of cool and warm irrigation water. *Water Resour. Res.*, 6, 230—238.