

降雨後の地下水涵養過程に関する観測

Observation of Groundwater Recharge Process after Rainfall

李宝慶*・中川慎治**・古藤田一雄**

Bao-Ching LI, Shinji NAKAGAWA and Kazuo KOTODA

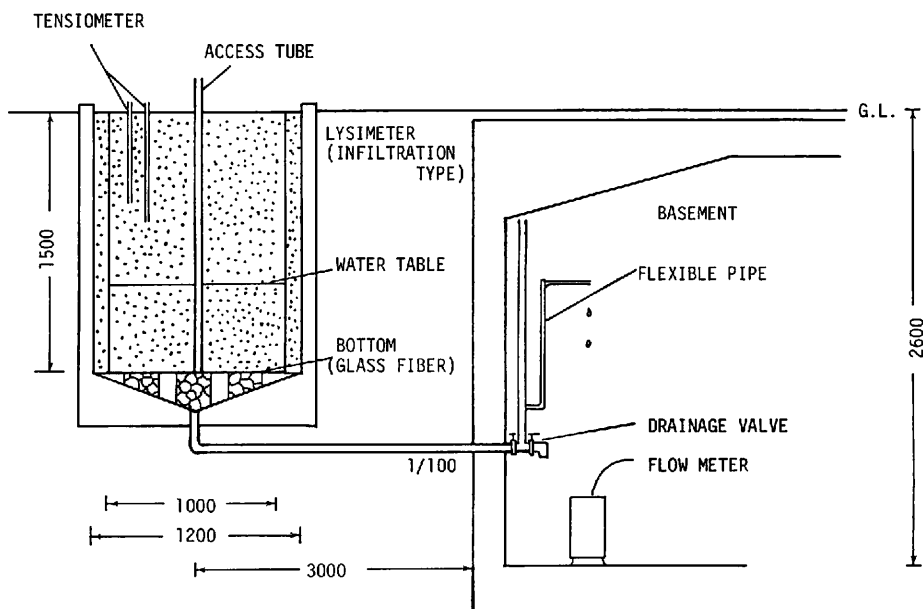
I はじめに

降水が地表面に達すると、土壤中に浸入し、土壤水分量を増加させる。降下浸透水は、土壤水分量を増加させながら下方へ移動し、毛管水帯を経て地下水面に到達し、地下水を涵養する。このような地下水涵養過程を解明するため、野外砂槽コラムを利用して観測を行った。この観測結果について報告する。

II 実験施設と観測項目

本実験は筑波大学水理実験センター圃場内に設置された浸透型ライシメータを使用して行った。浸透型ライシメータには中央粒径0.18mmの細砂が充填されている。第1表に砂の物理特性を、第1図に実験施設の概要を示す。

ライシメータの中心には、中性子水分計用のアクセスチューブが砂層表面から深さ140cmまで埋



第1図 浸透型ライシメータの構造。単位は mm。

* 中国科学院地理研究所 **筑波大学水理実験センター

(1984年6月4日受理)

第1表 ライシメータに充填された砂の物理特性
(出口 (1980) による)

真比重	2.62
間隙率	45.0%
乾燥密度	1.38 g/cm ³
飽和透水係数	4.51×10 ⁻³ cm/sec
平均粒径	0.18 mm

設されている。このアクセスチューブを利用して、中性子水分計によって土壌水分量を測定した。

中性子水分計への影響を避けるため、アクセスチューブから約30cm離れた円周上に、12本のテンシオメータを埋設した。埋設深度は、砂層表面から、5、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、130cmである。テンシオメータを水銀マンオメータに接続して、土壌水の圧力水頭を測定した。

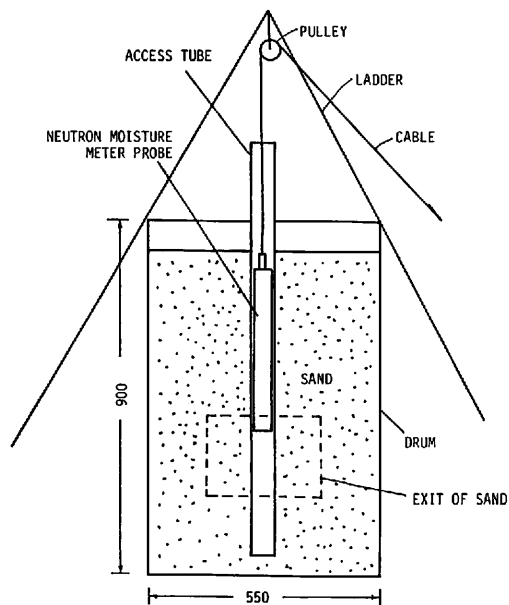
ライシメータ中の水は、ライシメータ底部の排水管により、約3m離れた地下室に排水される。地下室の排水バルブには透明塩ビ製パイプが取り付けられており、ライシメータ内の地下水位を監視できる。また、塩ビパイプ下部に高さ可変式のビニールパイプが接続されており、このパイプからも排水できる。本実験では、排水バルブを閉じ、ビニールパイプを用いて地下水面の高さを設定するとともに、ビニールパイプによって排水させた。排水出口の下方に転倒マス型流量計を設置し、チャート式電接記録計によって排水量を自記記録させた。

ライシメータ中の地下水位は、地下室の塩ビパイプで監視するとともに、砂槽中に埋設したパイプによって地表からも測定した。

なお、降水量は、水理実験センターのルーチン観測データ (古藤田ほか, 1978) を利用した。

III 中性子水分計のキャリブレーション

本実験では日本 ETL 製 SX-8 N 型の散乱型中性子水分計を使用した。水分量の測定範囲は 0.05~1.0 g/cm³ である。実験を行う前に、この中性子水分計のキャリブレーションを実施し、検



第2図 中性子水分計のキャリブレーション装置の概要。単位は mm。

定曲線を求めた。

中性子水分計のキャリブレーションには、容量 200ℓ のドラム缶を利用した (第2図)。キャリブレーションには、一日自然乾燥させた砂を用いた。キャリブレーションでは、毎回砂の中に適量の水を加えながら、鉄板上で空間的に均一の状態になるようにすばやく混ぜた後に、ドラム缶に詰めた。ドラム缶の中心にアクセスチューブを立て、約20cmの層厚になるように砂を入れ、足で踏み固めることを繰り返しながら、砂を詰めた。その後、表面から10cmと30cmの深さのところになん子水分計を挿入し、カウント数を計測した後、容積100ccのサンプラー管によって各々の深さの砂をサンプリングし、炉乾法で体積含水率を求めた。以上の作業を、水分量を変えながら9回行った。得られたデータを第2表に示す。

データは、筑波大学水理実験センターの小型電子計算機 MELCOM 70/25 によって処理し、最小自乗法近似により、検定曲線を求めた。

中性子水分計の計測値は、線源から半径約15cmの球内の平均的な水分量を表しているの

第2表 中性子水分計のキャリブレーション・データ

測定番号	深さ 10 cm		深さ 30 cm	
	カウント比	水分量	カウント比	水分量
1	0.025	0.019	0.037	0.019
2	0.030	0.029	0.058	0.024
3	0.045	0.069	0.096	0.069
4	0.062	0.102	0.134	0.102
5	0.124	0.136	0.179	0.129
6	0.169	0.185	0.283	0.191
7	0.244	0.239	0.347	0.241
8	0.286	0.258	0.359	0.247
9	0.360	0.326	0.504	0.335

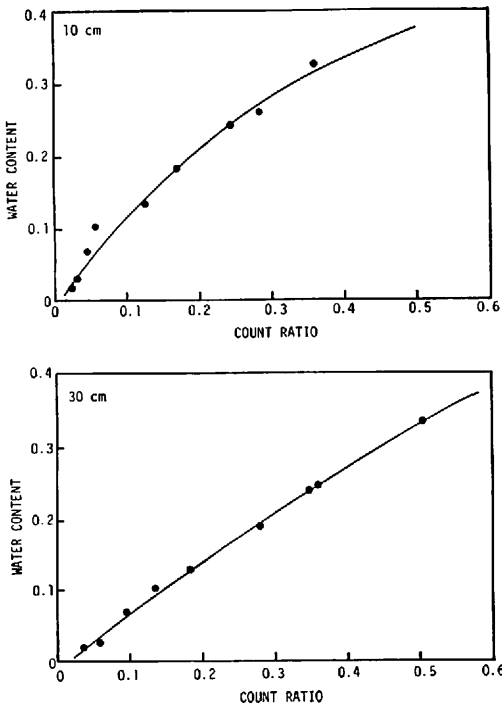
曲線は、深さ10cm用と20cm以深用の2つのものを求めた。すなわち、

深さ10cm用

$$\theta = 0.0225 + 0.8634n \quad (1)$$

$$\theta = 0.0065 + 1.1877n - 0.9033n^2 \quad (2)$$

$$\theta = -0.0194 + 2.0380n - 6.5088n^2$$



第3図 中性子水分計の検定曲線(上:深さ10cm; 下:深さ30cm)。図中の黒丸は測定値、実線は2次回帰式による検定曲線を表す。

$$+ 9.7717n^3 \quad (3)$$

深さ20cm以深用

$$\theta = -0.0012 + 0.6851n \quad (4)$$

$$\theta = -0.0128 + 0.8280n - 0.2796n^2 \quad (5)$$

$$\theta = -0.0230 + 1.0331n - 1.1983n^2 + 1.1150n^3 \quad (6)$$

ここで、 θ は体積含水率、 n はカウント比である。第3図に2次式((2)式と(5)式)による検定曲線を示す。

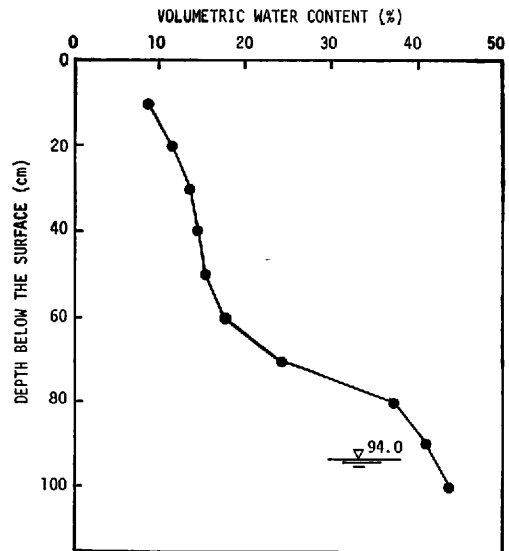
IV 観測結果

高さ可変ビニールパイプの流出口(第1図参照)を閉めて地下水の排水を生じさせない条件と、ビニールパイプから排水を生じさせる条件の2つの条件を設定して実験を行った。

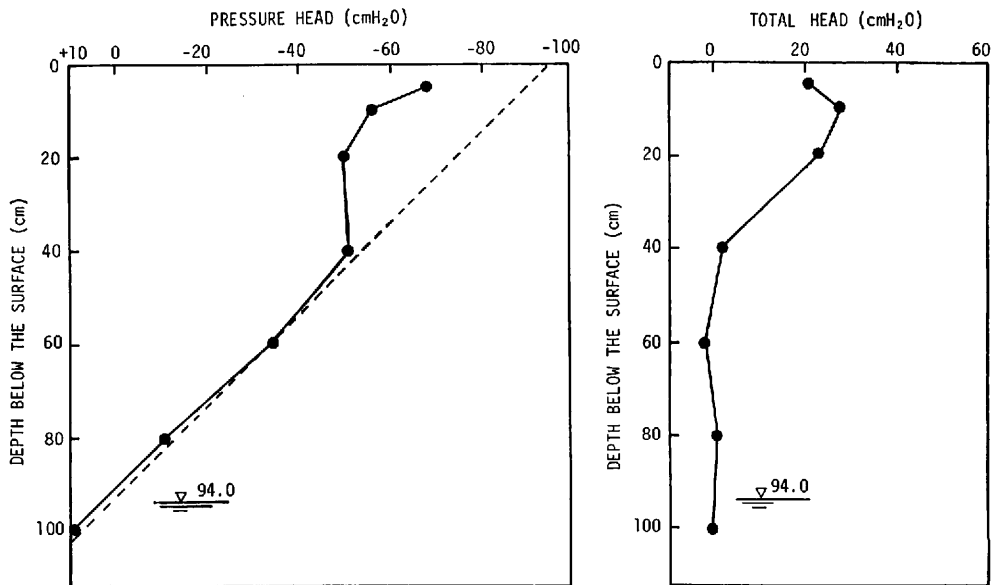
1) 地下水を流出させない条件での観測

排水バルブと高さ可変ビニールパイプの流出口を閉めた後、約半月間観測した。砂層の含水量と地下水面は蒸発や降水浸透の過程を通じて特徴的な変化を示した。結果の一部(3月23日の体積含水率、圧力水頭、全水頭のプロファイル)を、それぞれ、第4図、第5図に示す。

第4図の水分量プロファイルから、地下水面の



第4図 水分量プロファイル(3月23日)。図中の数字は地下水面の位置を示す。



第5図 圧力水頭プロファイル(左)と全水頭プロファイル(右)(3月23日)。図中の数字は地下水面の位置を示す。

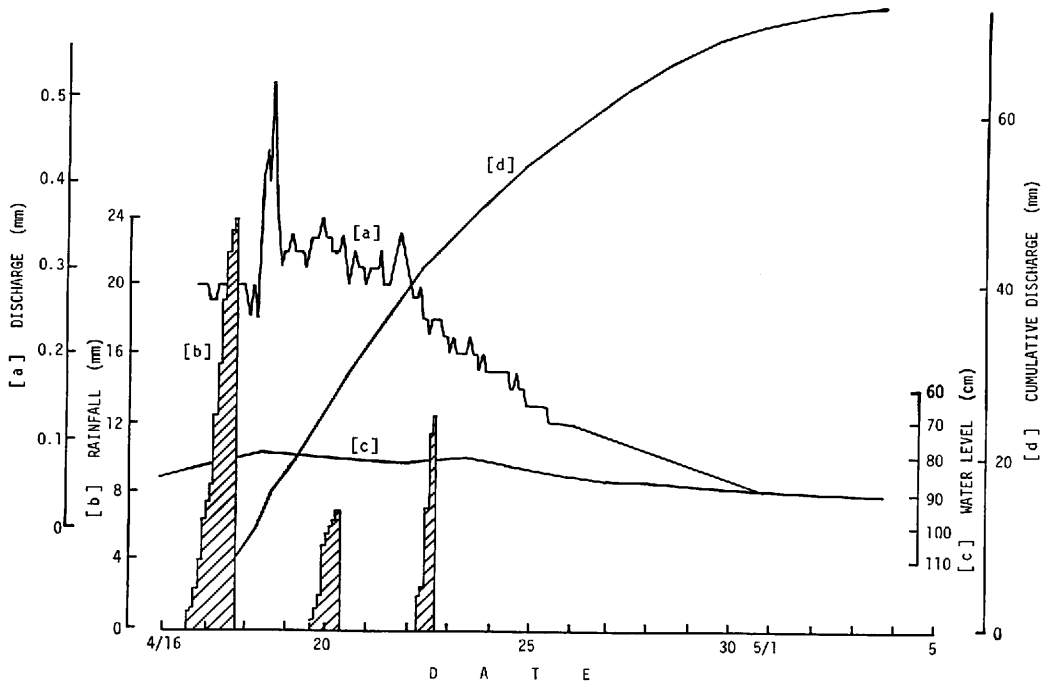
上に厚さ約40cmの毛管水帯が存在していることがわかる。この毛管水帯のうち、下の厚さ10cmほどの部分の体積含水率は43%程度で飽和状態に近くになっており、地下水位が上昇しても水分量の増加は認められなかった。飽和部分と不飽和部分の境界が明瞭でない一つの原因としては、地下水位が上昇しても、水が細かい間隙に浸入できず、多分の空気が閉じ込められた結果と考えられる。この上の部分の水分量は、地下水位の上昇に伴って増加した。さらに上の部分では、水分量は急激に減少し、体積含水率15%前後の圃場容量量に近づいている。したがって、この毛管水帯は、厚さ約10cmの飽和毛管水帯と厚さ約30cmの不飽和毛管水帯に分けられる。

第5図から、次の事が認められる。3月23日以前は、晴天が3日間続いていたため、表層の圧力水頭は減少し、表層部には蒸発による上向きフラックスが生じていた。これに対して、深さ20cm~40cmの間では、圧力水頭はあまり変化せず、下向きの全水頭勾配が1に近くなっていたことから、土壌水が降下浸透中で下向きのフラックスが生じ

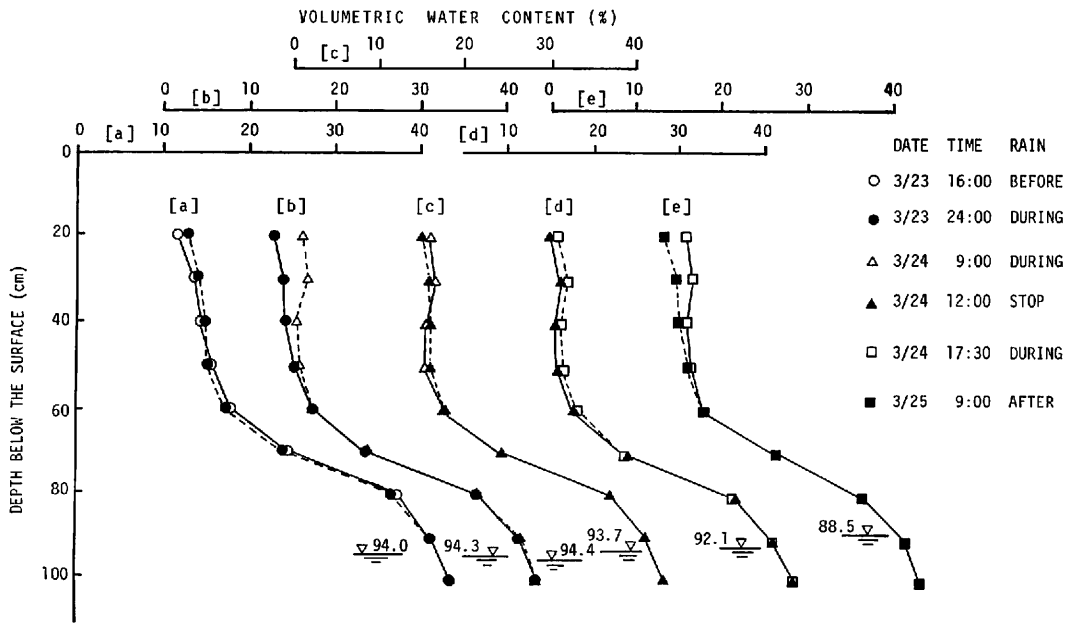
ていることが認められた。深さ10cm位のところは、蒸発による上向きのフラックスと、浸透による下向きのフラックスの境界面にあたり、フラックスがゼロとなるゼロフラックス面(樋口, 1978)が出現している。深さ40cm以深の部分では、全水頭勾配がほぼゼロになっており、この部分が毛管水帯であることがわかる。

2) 流出がある場合の観測

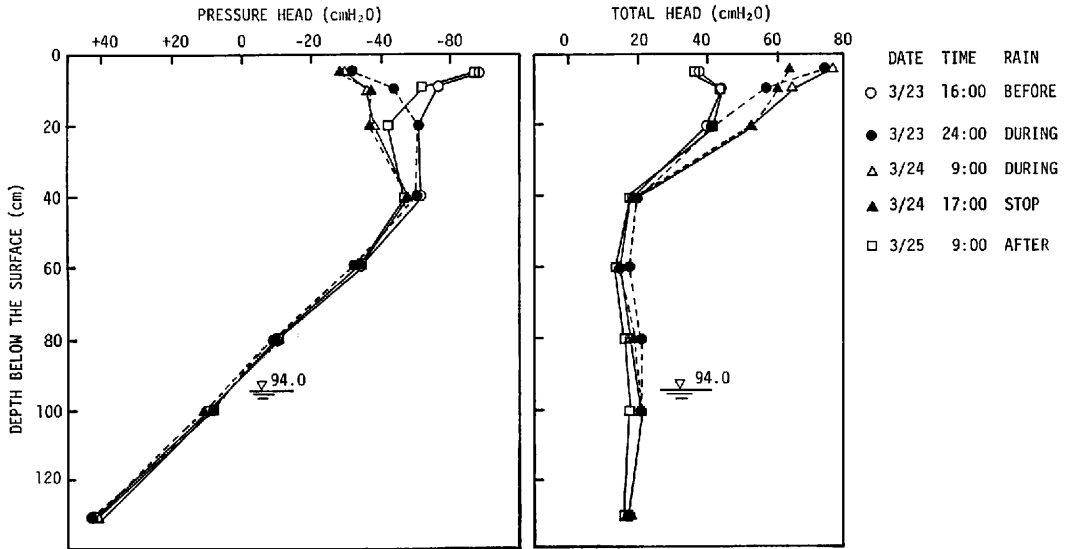
4月7日から、高さ可変ビニールパイプの流出口を開け、砂槽の地下水を排水できるようにした。この時、流出口の高さを砂槽中の地下水面(表面から92.2cm)に設定した。このように設定した後の降水量、砂槽の地下水位、流出量などの経時変化を第6図に示す。この図で降水量は、一雨ごとの積算値で示してある。排水は、4月16日から17日にかけての総降雨量24mmのときは、約1日おくられてみられたが、総降雨量12mm以下の20日および23日の降雨のときは明瞭な対応関係はみられなかった。これは、砂層中の土湿不足の補給と地下水位の上昇による貯留水量変化となっていたためと考えられる。



第6図 降雨、地下水位、排水量の経時変化



第7図 降雨前後の水分量プロファイル。図中の数字は地下水面の位置を示す。



第8図 降雨前後の圧力水頭プロファイル(左)と全水頭プロファイル(右)。図中の数字は地下水面の位置を示す。

V 考 察

ここでは、3月23日、24日における降雨前後の砂層の水分量プロファイル(第7図)、圧力水頭プロファイル(第8図)、全水頭プロファイル(第8図)、および水分率と地下水位との関係(第9図)を例として取り上げ、若干の考察を行うことにする。

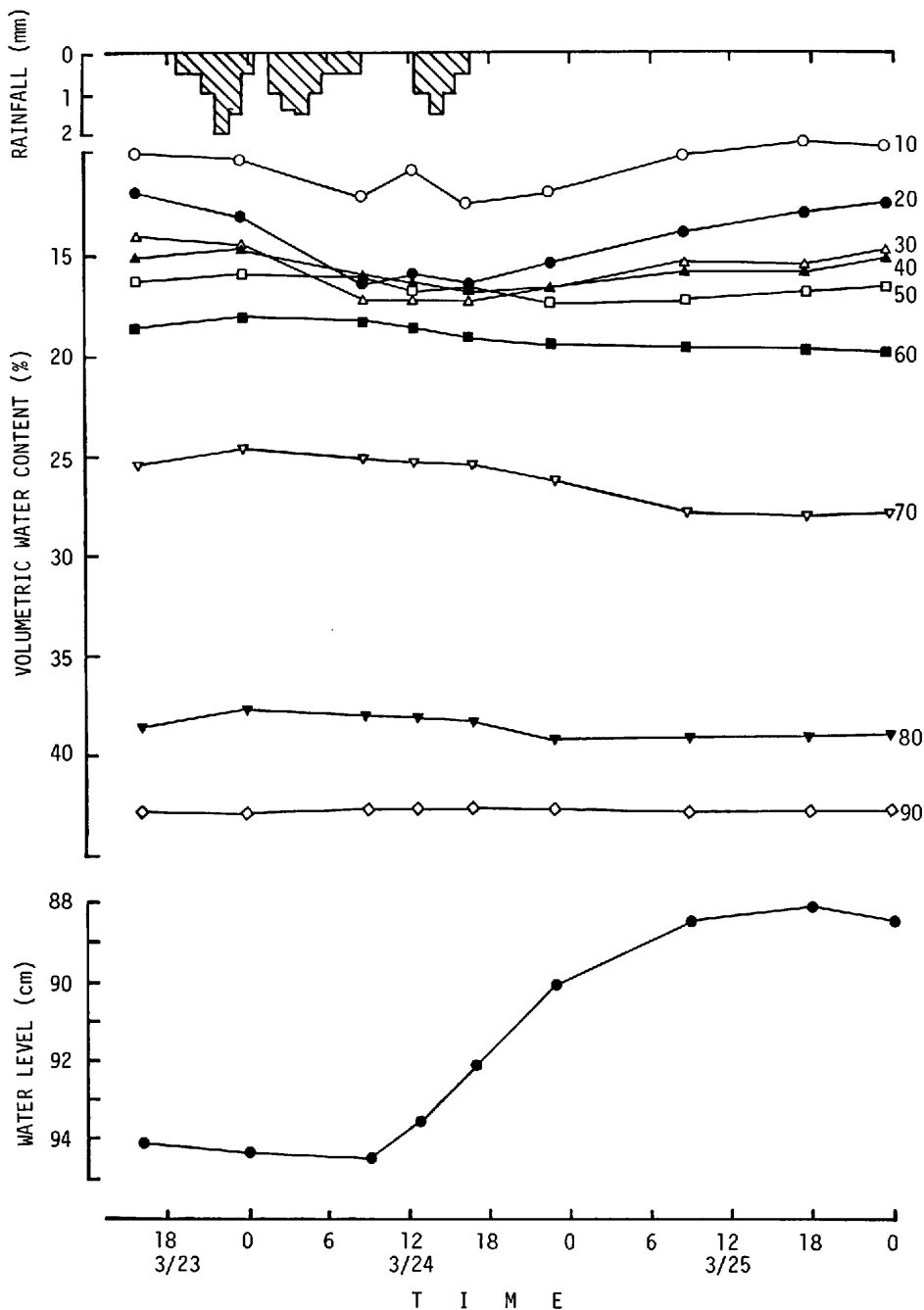
1) 地下水の涵養機構について

雨が降り始めた3月23日19時から4時間経過した24日0時に測定した水分プロファイルから、30cm以浅の層で水分量の増加が認められ、ぬれ前線が30cmの深度に達していることがわかる(第7図a)。この時の10cm、20cm、30cmの各深度における体積水分率の増加は、それぞれ、1.4%、1.2%および0.4%であった。

24日9時の観測による水分プロファイルから、ぬれ前線は50cmの深度まで到達していることがわかった。この時の水分率は、10cm、20cmの深度で最も多くなっていた。30cm、40cm、50cmの深度においては、0時の時より、それぞれ、3.1%、0.9%、0.1%水分量が増加していた。

これに対し、深度50cm以深の水分率は、降雨前の水分率とほとんど変わりがなく、ぬれ前線は認められなかった。第4図に示される水分プロファイルから、毛管水帯の上端の位置は、地表面から40~50cmの間にあることが推定されるが、降雨による降下浸透水の移動状況は、この毛管水帯より上部の懸垂水帯中では、ぬれ前線の降下として明瞭に測定できたが、降下浸透水が毛管水帯上端に達した後は、ぬれ前線が消失してしまうことが明らかとなった。

24日10時から13時まで、雨が一時止んだが、この間の12時30分の観測結果では、50cm以深の水分率に変化が殆んど認められなかったにもかかわらず、地下水面は地表面からの深さ94.4cmから93.7cmへと約0.7cm上昇していた。この深さ50cm以深の水分率の変化が認められなかった領域は、前述したように毛管水帯にあっており、これらの観測結果から以下の事柄が唆される。すなわち、ぬれ前線が懸垂水帯を降下して不飽和毛管水帯上端、すなわち、毛管水帯の上限の位置に到達すると、毛管水帯中で土壌水の一齐移動が始まり、地下水面を通過するフラックスが生ずる。この現象



第9図 降雨に対する水分量変化と地下水位の応答。図中の数字は水分量の測定深度 (cm) を示す。

は、佐倉・谷口 (1983)、向井 (1984) によって報告されているものと同様のものである。

以上の考察から、次のようなことが指摘され

る。地表面から供給された降下浸透水の地下水涵養にとって、毛管水帯は重要な役割を持っている。また、懸垂水帯は、降下浸透と蒸発の場であ

るため、その下部の毛管水帯と同様、水収支には大きな役割をはたす。また、土壌の排水改良にとっても、毛管水帯は重要な意味をもっている。すなわち、排水水帯改良地域では、地表排水だけでは充分でなく、地下水位と毛管水帯も低下させる必要があることが指摘できる。

2) ゼロフラックス面について

第8図の水理水頭プロファイルを見ると、降雨前の23日16時には、深さ10cm前後にゼロフラックス面が形成されている。しかし、降雨開始8時間後の24日0時には、全層下向きのフラックスに変わり、ゼロフラックス面は消失していた。24日16時30分頃に雨が止み、17時30分に測定した時には表層の全水頭は減少し始めており、25日9時には、降雨前と同様の全水頭プロファイルが形成され、ゼロフラックス面が再び現われていた。

降雨後に生じたゼロフラックス面より下部の上壤水は下方へ移動するため、地下水からの蒸発はおこらない。しかし、晴天が続いて地表面からの蒸発散が継続されれば、ゼロフラックス面は下方へと移動する。関東ローム層における野外観測によれば、この深度は1mに達することもある(樋口, 1978)。したがって、ゼロフラックス面の形成と土壌の塩化防止についての関係は、さらに研究する必要があるように思われる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、筑波大学樫根勇教授、吉野

正敏教授には、種々ご指導いただきました。ここに感謝いたします。水理実験センターの小島豊盛技官をはじめ職員の皆様には、観測設備、資料など種々御便宜をはかっていただきました。また、水文学講座の学生・院生諸氏には、中性子水分計のキャリブレーションの際に協力していただきました。ここに、深く感謝いたします。

なお、本報告は、李宝慶が筑波大学地球科学系研究生として滞在している間、水理実験センター熱収支・水収支圃場の施設を利用して行った研究の一部をまとめたものである。

文 献

- 古藤田一雄・佐倉保夫・林陽生・甲斐憲次(1978): 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について。筑波大学水理実験センター報告, 2号, 65—89.
- 佐倉保夫・谷口真人(1983): 上壤水の移動特性に関するカラムを用いた降雨浸透実験。地理評, 56, 81—93.
- 出口賢二(1980): 水位変動に伴う不飽和帯の水分移動についての実験的研究。筑波大学自然科学類卒業論文, 61p. (未公表)
- 樋口政男(1978): 不飽和帯における水の挙動。筑波大学地球科学研究科学学位論文, 160p. (未公表)
- 向井雅之(1984): NaClをトレーサーに用いた地中水移動に関する実験的研究。筑波大学自然科学類卒業論文, 80p. (未公表)