

土壌面蒸発に及ぼす地下水面深度の影響

Effect of Groundwater Depth on the Bare Soil Evaporation

木村 文康*・檜山 哲哉**・嶋田 純***

Fumiyasu KIMURA, Tetsuya HIYAMA and Jun SHIMADA

I はじめに

土壌面蒸発は、放射量や気温・湿度・風速等の土壌の外的要因と、地下水面深度や地温・土壌水分量・不飽和透水特性等の土壌の内的要因との大小により、その形態が変化する。実際の野外環境においてこれらの要因一つ一つと蒸発量との関係を知ることは非常に困難であり、外的あるいは内的要因のいずれか一方を人工的に制御して求める他に方法はない。

野外環境における土壌面蒸発形態を理解するために、実験室内において外的あるいは内的要因を制御した基礎的研究が従来数多く行われてきた。それらの実験的研究は、地下水面を設定せずに小型のカラムを用いた研究と、地下水面を設定し地下水面から土壌表層までの水分移動を考慮した研究の2つに大別できる。設定の容易さにより、後者よりも前者の方が数多く存在する。数少ない後者の中で、Gardner and Fireman (1957) は地下水面までの深さが蒸発速度に及ぼす影響を調べ、外的要因が蒸発能力に関係しなくなる深さを求めた。また Willis (1960), Hassan and Ghaibeh (1977), 山本・田中 (1987) は地下水位一定条件下において単層土壌と成層土壌の蒸発形態に及ぼす影響を調べた。

野外においては、内的要因、特に地下水面深度に着目し、その深度を一定に制御した実験的研究が行われてきた(例えば粕淵, 1978)。しかし、野外において数種の地下水面深度を人工的に設定し、自然環

境下での土壌面蒸発形態を比較した研究は無い。

本研究では、3本の浸透型ライシメータにより深度の異なる3種の地下水面を野外環境に設定し、地下水面深度の違いが実際の土壌面蒸発にどのような影響を及ぼすのかを定量的に把握することを目的として、実験を行なった。

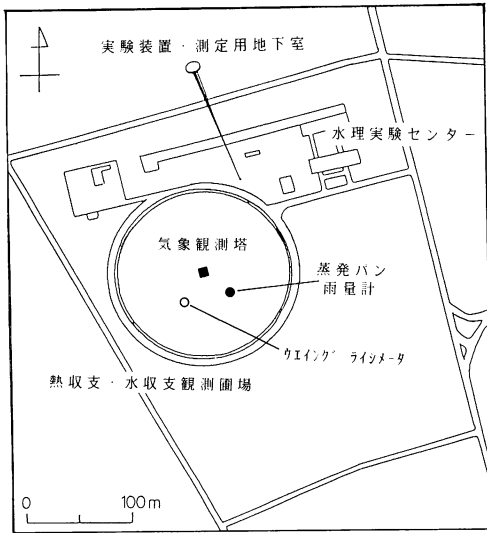
II 実験および観測方法

1) 実験装置の概要

実験装置は同一断面積で高さの異なる3本の浸透型ライシメータと、それらを地表面下に埋設した状態で測定を行うための地下室から構成されている。実験装置は筑波大学水理実験センター構内に設定した(第1図)。

ライシメータは内径44cm、厚さ1cmの塩化ビニール製のパイプの片端に同径の円形アクリル板を接着し、これを底面としている。3本のライシメータの高さはそれぞれ50cm、90cm、130cmである。ライシメータ内部には土壌試料として豊浦標準砂を水締めにより充填した。ただし底部には下から中礫、粗砂を厚さ3cmずつ敷き詰め、その上にステンレスメッシュフィルター及びグラスウールフィルターを敷き、充填した豊浦標準砂が、ライシメータから後述の給水・排水装置に流出するのを防いだ。ライシメータの中心部には中性子水分計での測定用のスチール製アクセスチューブを埋設し、その周りに同心円状に複数の深度に対するテンシオメータを、さらに

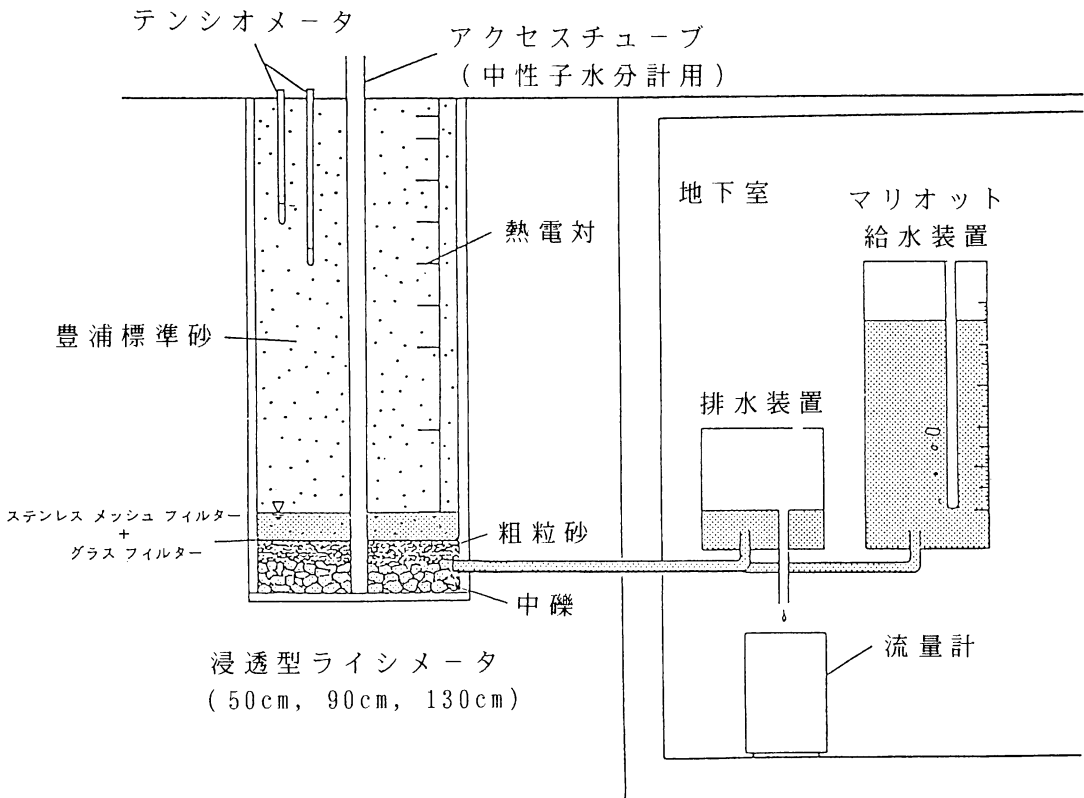
*筑波大学第一学群自然学類(現 宮城県庁) **筑波大学大学院地球科学研究科 ***筑波大学地球科学系・水理実験センター



第1図 観測地の概略図

その外側に地温計測のための熱電対を埋設した。

各ライシメータの底部側面からは2本のパイプを地下室に導き、一方に単管マリオット式の給水装置を、他方に排水装置を接続した。降雨等によってライシメータ内の地下水水位が上昇した場合には、オーバーフローによって一定水位を維持することができる排水装置から排水される。排水量は転倒マス式雨量計(1転倒は0.103mmに相当)で記録される。逆に蒸発によって地下水水位が低下しようとする場合には、マリオット式給水装置から不足水分が給水される。給水量はマリオット管の目盛りを定期的に読むことにより記録できる。このように、降雨・蒸発のいずれに対してもライシメータの地下水水位が一定に維持され、かつ排水量・給水量が記録できるように工夫されている。実験装置の概略図を第2図に、設置状況を写真1に示す。



第2図 実験装置の概略図

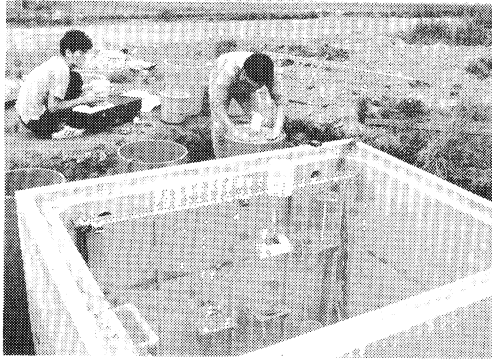


写真1 実験装置の設置状況

地下水面の深度は、3本のライシメータを用いてそれぞれ40cm、80cm、120cmの3種類に設定した。ライシメータの上端面は地表面と同じ高さになるように埋設した。

2) 観測方法

観測は夏季において蒸発が盛んに行われる時期とし、1991年6月から同年10月の間に行なった。

観測期間中の測定項目は、転倒マス雨量計（1転倒0.5mm）で降水量を、同じく転倒マス雨量計（1

転倒0.103mm）で排水量を、単管マリオットで供給量を、水銀マンomet式テンシオメータで圧力水頭を、中性子水分計で体積含水率を、そして銅-コンスタンタン熱電対で地温をそれぞれ測定した。これらの測定項目とデータ集録方法及び測定間隔(期日)を第1表に示す。

テンシオメータ、中性子水分計及び熱電対地温計の測定深度を第2表に示す。表中の50cm、90cm、130cmとあるのは、それぞれその高さのライシメータを意味する。“○”の表示のある部分に対応した深度が、それぞれの測定深度である。

3) 測定装置の検定

(1) 中性子水分計

本研究で使用したETL製SX-8N型の散乱型中性子水分計は、計数率と体積含水率との関係をあらかじめ求めておく必要がある。

検定には130cmライシメータと同型の大型塩化ビニール製パイプ容器を使用した。低水分領域については乾燥した豊浦標準砂を、高水分領域については水(含水率100%に相当)を用い、それぞれを容器に入れ、各々の表面から50cm、100cmの深度に中性子

第1表 測定項目と観測方法

測定項目	測定機器	データ集録法	測定間隔
降水量 (P)	横河ウェザック社製 転倒マス雨量計 (0.5mm)	水理実験センターによる ルーチン観測資料 (田ほか, 1993)	毎時
排水量 (D)	横河ウェザック社製 転倒マス雨量計 (0.103mm)	コーナー札幌社製 DS-64K データロガー による自動集録	毎時
給水量 (I)	マリオット管 (自作)	マリオット管にゲージを付け、水位の変化を マニュアルで測定・記録	毎日(6/3-7/25) 数日に1回(7/25以降)
圧力水頭	水銀マンomet式 テンシオメータ (自作)	水銀マンometの水銀柱高をマニュアルで測 定・記録	同上
土壌水分量	日本ETL社製SX-8N型 散乱型 中性子水分計	1分間あたりの カウント値を マニュアルで記録	5/28, 6/6, 6/15 9/10(6回), 10/7 10/21
地温	横河電機製作所製 mini YODAC-3874型 熱電対地温計	左記と同機により 自動集録	毎時

第2表 各測定装置の測定深度

測定深度 (cm)	テンシオメータ			地 温 計			中性子水分計		
	50cm	90cm	130cm	50cm	90cm	130cm	50cm	90cm	130cm
5	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○	○		○	○
40	○	○	○	○	○	○		○	○
50		○	○		○	○		○	○
60					○	○		○	○
70		○	○						○
80					○	○			○
90			○						○
100						○			○
110									
120			○			○			

水分計を挿入し、その時点で計数率を計測した。低水分量域については、100cc 土壌サンプラー管によって3個のサンプリングを行ない、炉乾法(115°Cで24時間炉乾燥)により体積含水率を求め、その平均値を用いた。この他の中間領域の水分状態に対しては、筑波大学川上演習林において実測された各種水分量の実測値(土壌サンプリング炉乾法による)と中性子水分計による計測値との対比(いわゆる野外キャリブレーション法)によった。計数率と体積含水率との関係をプロットし、その回帰分析を行なったところ、以下の2次回帰式が求められた。

$$\theta = -1.41 + 59.98n + 33.58n^2 \quad (1)$$

(R² = 0.970)

ここで θ は体積含水率(%), n は計数率である。本研究では(1)式により体積含水率を求めた。

(2) 熱電対地温計

観測に用いた23本の熱電対について、標準温度計による真の温度と比較するために検定を行なった。検定にはヒーターにより水温を上昇させ、かつ水温

が一定にできるヒーター付攪拌器を用いた。水温は7°Cから42°Cの範囲で検定を行ない、標準温度計による温度と23本の熱電対による温度について各々回帰分析を行なった。ここではその回帰式は省略する。

(3) 単管マリオット給水装置

単管マリオットの原理を用いて作成した給水装置については、任意の水位変化に対する実際の水分供給量を調べておく必要がある。そこで本研究では以下のような検定を行なった。

まず給水装置を水で満たし、排水装置の排水口からメスシリンダーで250cc ずつ正確に排水し、このときの給水装置の水位差を読み取った。その後マリオット管の水位が1 mm 下がったときに給水される量を3本のマリオット管についてそれぞれ求めた。

各マリオットの水位変化(Δh (mm))に対する供給量(I (mm))の式はそれぞれ以下になった。

50cm ライシメータ給水装置; I = 1.146 Δh

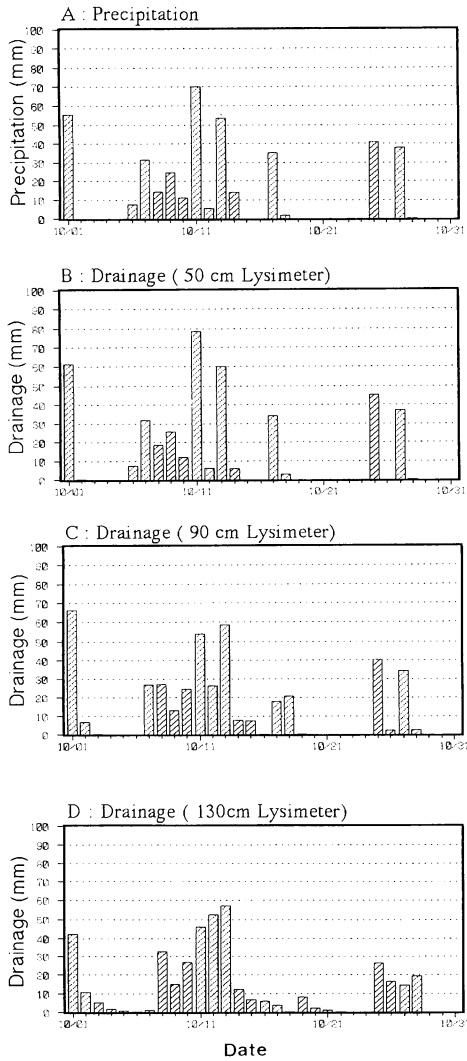
90cm ライシメータ給水装置; I = 1.138 Δh

130cm ライシメータ給水装置; I = 1.150 Δh

III 観測結果と考察

1) 各ライシメータの水収支

1991年10月における降水量とそれともなう各ライシメータからの排水量の経日変化を第3図に示す。降水があつてから排水が完了するまでの時間に、ライシメータ間で明瞭な差が存在することがわかる。50cm ライシメータは降水が完了してから1日以内で排水が完了しているのに対し、90cm ライシメータは



第3図 降雨にともなう各ライシメータからの排水量の応答

1～2日の排水期間を有し、130cm ライシメータでは4～5日かかっている。これらの日数は、各ライシメータの貯留時間と考えることができる。

第4図は各ライシメータに対するマリ奥特給水装置からの給水量変化を示している。ここで50cm ライシメータの7月26日～8月2日、8月19日～9月7日の各期間は、データ欠測のため後述する水収支の計算からは除外した。図より50cm ライシメータへの給水量が最も多いことがわかる。90cm ライシメータへの給水量は、50cm ライシメータと比較すると約1/5程度でかなり少ない。一方130cm ライシメータでは、マリ奥特からの給水は実質的にほとんどなく、横軸と重なっている。

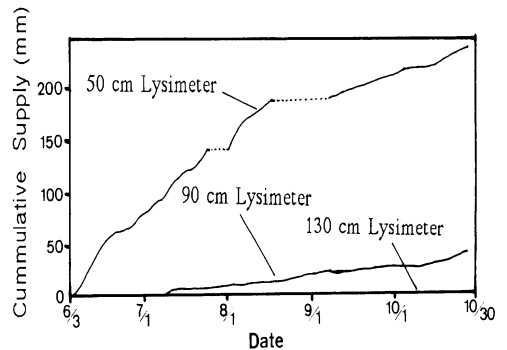
以上のようにして求められた降水量 (P)、排水量 (D) 及び給水量 (I) を用いて水収支法による蒸発量 (E) の算出を行なった。

一般に、蒸発面 (檜山ほか, 1993) の直下のある厚さをもつ媒体または水体の水収支式は次式で表される。

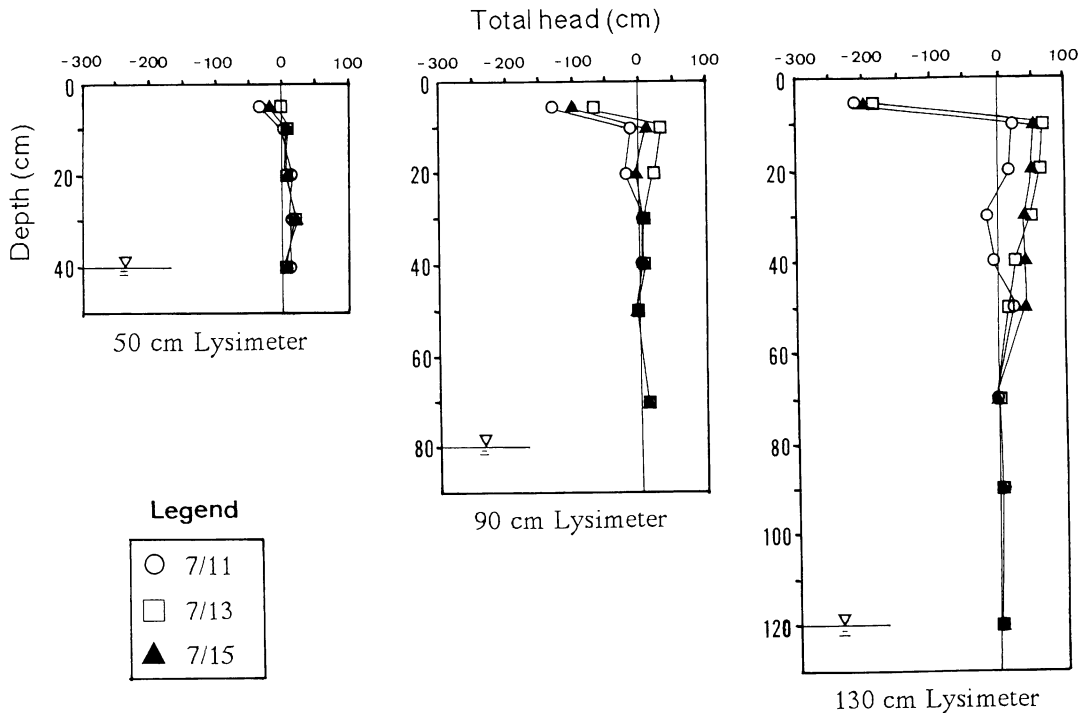
$$E = P - R - D - \Delta S \quad (2)$$

ここで E は蒸発量 (mm)、P は降水量 (mm)、R は表面流出量 (mm)、D は媒体・水体からの流出量 (mm)、そして ΔS は媒体・水体の貯留量変化量である。

本実験ではマリ奥特給水装置による地下水面への水分補給が存在するので、これを I (mm) とすると、



第4図 各ライシメータの給水量変化



第7図 各ライシメータの水利水頭プロファイルの経日変化

にともなうフラックスに限られるためと考えられる。

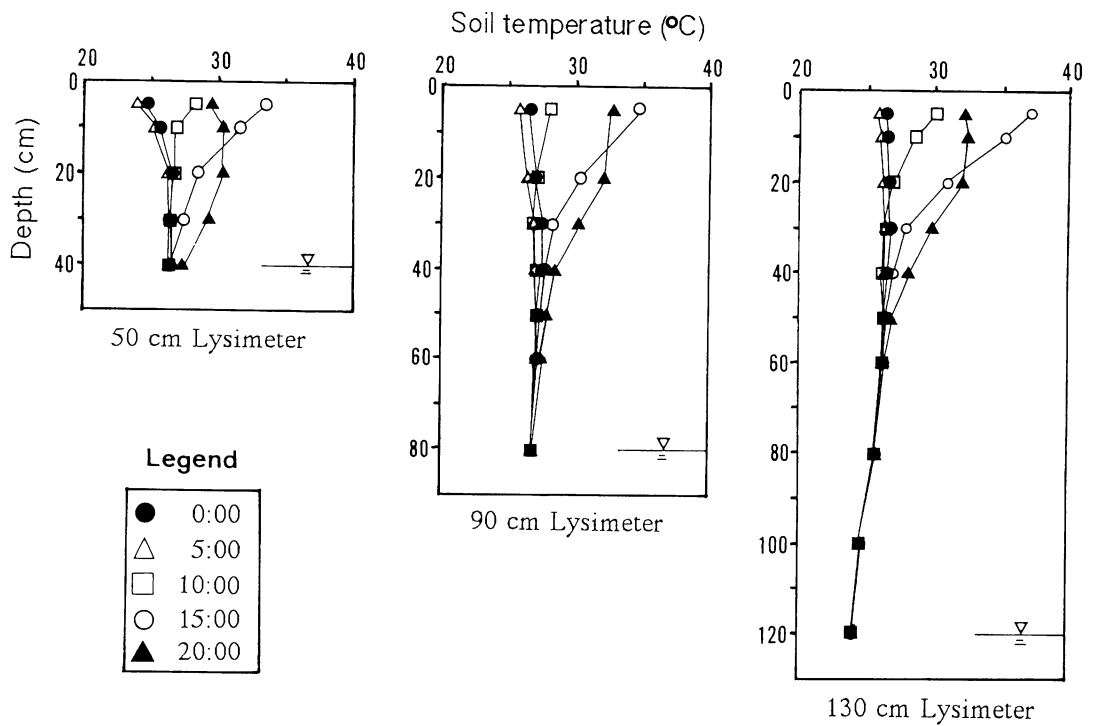
4) 地下水面深度と液状水移動, 水蒸気移動の関係

蒸発とは液状水が水蒸気に相変化し, 大気中に拡散する現象であることを考えると, 液状水によるフラックスの他に, 土壤中の水蒸気フラックスを考慮する必要がある。液状水フラックスはゼロフラックス面を境にその方向が逆転するが, 水蒸気フラックスについてはどのようなメカニズムによるのかを, 地温プロファイルから考察する。

第8図は7月11日における各ライシメータの地温プロファイルの日変化を示す。表層付近でも水分量が多い50cm ライシメータでは表層の地温変化の振幅が小さいのに対して, 90cm, 130cm ライシメータの表層では日中特に高温域に大きな変化をしている。50 cm ライシメータの地表付近は毛管水帯の上縁にあるため, 土壤水分の存在が地温の日変化を和らげていると考えられる。一方90cm, 130cm ライシメータの表層は両者ともかなり乾燥しており, 水と砂の比熱の違いが大きく反映していると考えられる。地下水

面付近の地温変化をみると, 深度が深いほど気温の日変化を受けにくくなり, ある一定の深度で日変化を示さなくなる。この深度は90cm と130cm ライシメータのプロファイルから, 約60cmである。50cm ライシメータでは地下水面上の深度40cm でも微小に日変化をしている。ここで, 土壤中の水蒸気移動が全て熱拡散によると仮定すれば, 水蒸気フラックスは理論的には温度傾度とは反対方向になる。したがって深度60cm より上部では, 水蒸気フラックスは日中10時過ぎから20時過ぎの間は下向きであるが, 夜間の0時から午前10時までは上向きとなる。一方60cm より下部では常に下向きになる。つまりこの深度で水蒸気フラックスは日変化による方向の逆転を生じ, この深度が水蒸気移動のゼロフラックス面に相当していると考えられる。

前述したように, 液状水としては90cm と130cm ライシメータはほぼ同量のフラックスであった。しかし, 実際の蒸発量は第3表に示したように, 90cm ライシメータのほうが130cm ライシメータよりも多か



第8図 各ライシメータの地温プロファイルの日変化

った。これは、90cm ライシメータでは水蒸気移動のゼロフラックス面が毛管水帯の上縁に存在しており、夜間から午前にかけて水蒸気による上方移動が生じていたためと考えられる。一方130cm ライシメータでは毛管水帯の上縁に水蒸気移動のゼロフラックス面が及ばなかったために、水蒸気の形態においても地下水面からの上方移動が起こらず、よって地下水面からの水分供給がなかったものと考えられる。

IV まとめ

以上、地下水面深度の異なる3つのライシメータを用いて、野外環境下における土壌面蒸発形態の差異を考察してきた。これらをまとめると以下のようになる。

- (1) 地下水面深度が深くなるほど、土壌面蒸発量に占める地下水面からの水分供給量の割合は減り、土層中の貯留量からの割合が増す。
- (2) 地下水面深度が深くなるほど、表層での水理水頭勾配は増加する。しかし不飽和透水係数は

指数関数的に小さくなるため、表層での液状水フラックスは地下水面深度が深くなるほど小さくなる。

- (3) 液状水移動及び水蒸気移動はそれぞれ水理水頭および地温プロファイルの勾配に依存する。地下水面深度が深くなるほど液状水のゼロフラックス面、及び水蒸気のゼロフラックス面と地下水面上に形成される毛管水帯の上縁との距離が大きくなり、液状水及び水蒸気フラックスは小さくなる。この結果土壌面蒸発量も小さくなる。

文献

- 粕淵辰昭 (1978) : 地下水位一定条件下における土壌の水・熱収支. 農土論集, 75, 20-25.
- 田少奮・杉田倫明・嶋田純 (1993) : 熱収支・水収支観測資料-1991年-. 筑波大学水理実験センター報告, No. 17, 157-187.
- 鈴木克律・谷口真人・古藤田一雄 (1990) : 蒸発による土

- 壤水分移動に関する実験的研究. 筑波大学水理実験センター報告, No. 14, 59-67.
- 檜山哲哉・嶋田純・古藤田一雄 (1993) : 静電容量式高分子膜湿度センサーによる乾燥表層の形成機構の評価. 筑波大学水理実験センター報告, No. 17, 109-118.
- 福原輝幸・ジョージ・F・ピンダー・佐藤邦明 (1990) : 表面乾燥過程における飽和一不飽和多孔媒体中の熱・水分完全連成移行解析へのアプローチ. 土木学会論文集, 423 (14), 111-120.
- 山本太平・田中明 (1987) : 地下水位一定の土壌カラムからの蒸発と水分量分布の定常解析. 農土論集, 129, 17-24.
- Gardner, W.R. and Fireman, M. (1957) : Laboratory studies of evaporation from soil columns in the presence of a water table. *Soil Sci.* 85, 244-249.
- Hassan, F.A. and Ghaibeh, A. (1977) : Evaporation and salt movement in soils in the presence of water table. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41, 470-478.
- Willis, W.O. (1960) : Evaporation from layered soils in the presence of a water table. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 24 (4), 239-242.