

植物の成長と茎内流量を考慮した 蒸発散特性と土壌水分流動に関する研究

A STUDY ON EVAPO-TRANSPIRATION AND SOIL MOISTURE MOVEMENT CONSIDERING PLANT GROWTH AND SAP FLOW

東 博紀¹・岡 太郎²
Hironori HIGASHI and Taro OKA

¹学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町)

²フェロー会員 農博 京都大学防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

In order to investigate the water balance, rainfall infiltration, runoff, evapo-transpiration during plants growth, hydrological observations have been carried on using weighing lysimeter under the conditions of planted crops. Soil moisture content and sap flow of plants are measured using Amplitude Domain Reflectometry (ADR) probe and stem heat balance method (SHB), respectively. Leaf area and dry weight as the index of plant growth is measured, periodically. This paper describes the water balance and the evapo-transpiration based on these observed results and the results of vertical two-dimensional analysis of soil moisture movement considering the changes in the evapo-transpiration during the plant growth.

Key Words : sap flow, plant growth, evapo-transpiration, soil moisture movement, weighing lysimeter

1. はじめに

近年, 異常気象や人口増加を要因とする水不足問題が深刻化し, 水資源の有効利用計画の重要性が高まりつつある. 水資源を効率的に管理するためには, 流域における水文素過程を明確にし, 流域水収支を定量的に評価する必要がある. 特に, 蒸発散量は, 現地における実測が困難であるうえに現象に関与する要素がきわめて多いため, 的確な推定が容易ではなく, 蒸発散量の把握は水収支の精度向上に不可欠となっている.

自然丘陵地や農地などの蒸発散量は植物からの蒸散と水面や地表面からの蒸発で構成されているが, これらは植物の種類・生育・土壌水分状態によって大きく変化する. 植物は土壌が乾燥して根からの吸水が制限されると気孔を閉じて蒸散を抑制するが, このメカニズムは植物生理の分野で解明されつつある¹⁾ものの, 多くの因子が関与しているために蒸散抑制効果を定量的に評価する手法は確立されていないといっても過言ではない.

本研究では, 植物の成長と水消費, 雨水浸透・流出, 蒸発散機構を明確にすることを目的として, ウェイングラシメータ (Weighing Lysimeter) を用いて自然気象条件下で観測研究を行った. それと並行して, 植物の蒸散特性を明らかにするため, Stem Heat Balance method (SHB 法) を用いて植物の茎内流量の計測を試みた. ここでは, はじめに, ウェイングラシメータにおける水文観測の内容および茎内流量計測の手法について述べる. 次に, 茎内流量の計測結果の妥当性を吟

味し, 可能蒸散量と比較して蒸散抑制効果について議論する. 最後に, それを応用して植物の成長とともに変化する蒸散および地表面からの蒸発を考慮した鉛直2次元土壌水分流動解析を行った結果を示す.

2. 観測装置・手法

(1) ウェイングラシメータ

ウェイングラシメータの全容と土壌槽の構造をそれぞれ写真-1, 図-1に示す. 本ライシメータは3連のステンレススチール製土壌槽 (幅・横それぞれ1m, 深さ1.5m) よりなり, 各土壌槽の重量変化は分解能が0.1kg (雨量換算で0.1mm) の電子天秤を用いて直接測定できる仕組みになっている. ここで, 写真-1に示される右側の土壌槽をE(East), 中央をC(Center), 左側をW(West)と呼称することにする.

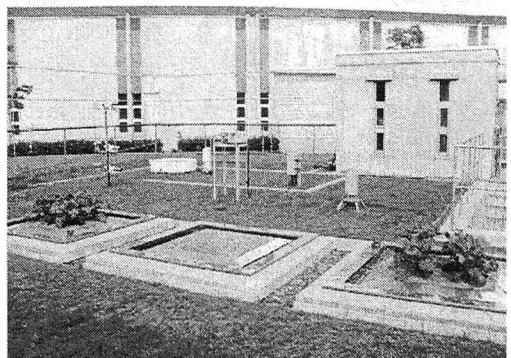


写真-1 ウェイングラシメータの全容

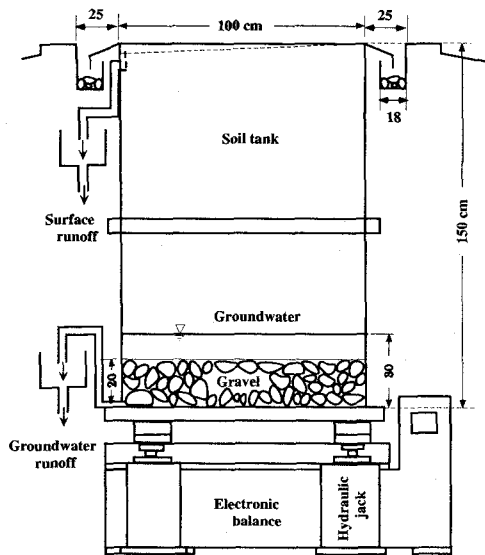


図-1 土壌槽の構造

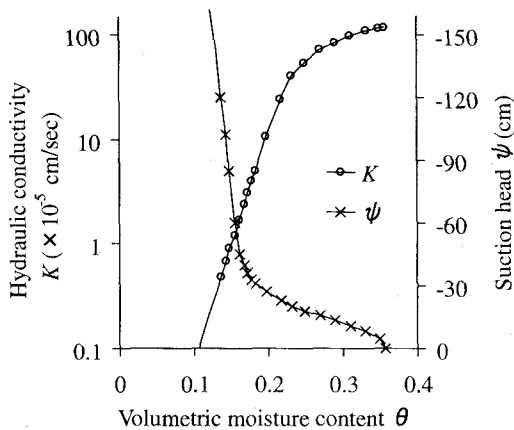


図-2 土壌物理特性

各土壌槽は底部より20cmは礫、その上部の130cmは図-2の土壌物理特性²⁾を有する京都府城陽市の青谷砂質土で充填されている。各土壌槽にはADR(Amplitude Domain Reflectometry)土壌水分計が設置され、深さ10, 20, 30, 40, 60, 100cmの土壌水分量が10分間隔で計測されている。

各土壌層の一辺には表面流を集水するために幅が3cmのステンレス製の板がV字状に取り付けられており、その最下部に内径1cmの集水口がつけられている。集水された表面流は1転倒が100cm³の転倒杓型流量計で測定される。各土壌槽の下部には地下水位制御と地下水排水のために排水口とホースガイドが取り付けられている。本ライシメータでは、地下水位を底部より30cmの位置に固定した。余剰の地下水もしくは土壌水は排水口より取り出され、1転倒50cm³の転倒杓型流量計を用いて計測される。

ライシメータによる観測研究には気象要素の測定が欠かせない。ここでは、土壌槽付近に観測露場を設け、表-1に示してある気象要素を観測している。

観測期間中、植物の成長とともに蒸発散量が増加することは十分に予想される。植物の成長と蒸発散量と

表-1 気象要素の観測項目・機器の性能

測定項目	測定方法	性能(分解能)	備考
雨量	転倒杓型雨量計	0.5 mm/転倒	
放射収支	放射収支計	25 mV/kW・m ²	
日射量	全天日射計	27 mV/kW・m ²	
乾湿球温度	白金抵抗体・通風筒付乾湿球温度計	± 0.5 °C	地表面より高さ180,90,45cm
風速	三杯型風速計	0 ~ 75 m/s	地表面より高さ185,95,50cm
地温	白金抵抗体型温度計	-10 ~ 70 °C	地表面より深さ5, 15, 25cm
地中熱流量	地中熱流計	20 mV/W・m ²	地表面より深さ5, 15, 25cm
蒸発量	直径120 cm A-pan	± 1 mm以内	フロート式水位検出器

の関係を表わすためには、植物の成長過程を定量的に表示することが必要である。本研究ではライシメータ付近に圃場を設け、土壌槽に植栽されている植物を多数育成するとともに定期的に2・3本採取し、各個体の背丈、葉数、葉面積、乾燥重量、茎径および根群域の深さを測定した。なお、個体はライシメータに植栽されている植物の葉数、背丈、子実数がほぼ一致するものを選別した。このようにして得た2001年5月3日~7月9日におけるトウモロコシの成長曲線を図-3に示す。

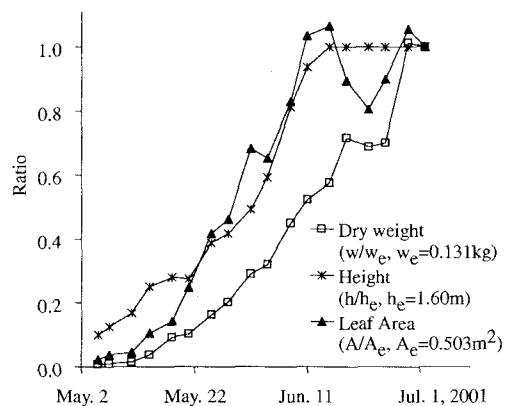


図-3 トウモロコシ1個体の成長

(2) SHB法による植物の茎内流量計測

植物の茎内流量は蒸散特性を明確にする有力な指標として注目を浴びている。熱を利用した茎内流量の測定は、1932年にHuberが提案したヒートパルス法をはじめ、現在までに多くの手法が開発されている^{3),4)}。茎を損傷させることなく計測が可能なSHB法⁵⁾は、茎の一部を連続的に加熱し、加熱した部位の熱収支より茎内流量を算定する仕組みとなっている。本研究では植物茎に幅5cmのヒータと6個のサーミスタを図-4に示すように配置し、1分間隔で各点の温度を計測した。

ヒータの熱量を Q とした時、(1)~(5)式に示してあ

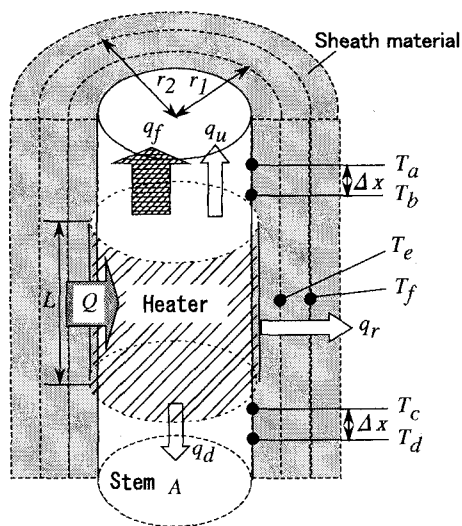


図-4 茎内流量計測の概要(SHB法)

る熱収支式が成立する。

$$Q = q_f + q_u + q_d + q_r \quad (1)$$

$$q_f = c_w F (T_b - T_c) \quad (2)$$

$$q_u = \lambda A (T_b - T_a) / \Delta x = \lambda A \Delta T_{b,a} / \Delta x \quad (3)$$

$$q_d = \lambda A (T_c - T_d) / \Delta x = \lambda A \Delta T_{c,d} / \Delta x \quad (4)$$

$$q_r = \frac{2\pi\lambda_s L (T_e - T_f)}{\ln(r_2/r_1)} = k (T_e - T_f) \quad (5)$$

ここに、 q_f :茎内流によって輸送される熱量、 q_u 、 q_d :それぞれ伝導によって上方、下方に失われる熱量、 q_r :周囲の断熱材を通して空气中に失われる熱量、 F :茎内流量、 c_w :水の比熱($=4.186 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 $T_{a \sim f}$:図-4に示してある位置 $a \sim f$ の温度、 A :茎の横断面積、 λ 、 λ_s :それぞれ茎、断熱材の熱伝導率、 L :ヒータの幅、 Δx 、 $r_{1,2}$:それぞれ図-4に示してある距離、 $k = 2\pi\lambda_s L / \ln(r_2/r_1)$ である。なお、植物の成長に伴って r_1 、 r_2 が増加するため、断熱材の厚さ($r_2 - r_1$)が一定であれば k は減少する。

(1)~(5)式を茎内流量 F についてまとめると(6)式を得る。

$$F = \frac{Q - \lambda A (\Delta T_{b,a} + \Delta T_{c,d}) / \Delta x - k (T_e - T_f)}{c_w (T_b - T_c)} \quad (6)$$

ただし、茎内流量が0の時にはヒータ上下の温度分布は等しくなるため、 $T_b = T_c$ となり(6)式は成立しない。また、低流量時は $T_b \approx T_c$ となるため、そのまま(6)式を用いると茎内流量は過大に算出される傾向にある。ここでは、V. L. Grime ら⁷⁾を参考に、 $|T_b - T_c| < 1.0 \text{ K}$ かつ $|q_f| < 0.2Q$ が成立する時は $F = 0$ とした。

3. 観測の結果と考察

2001年5月3日~7月9日、土壌槽EとWにトウモロコシを9本ずつ植栽し、水文観測を行った。土壌槽Cは比較のため裸地の状態を保っている。また、茎内流量は

ライシメータ付近の圃場において6月1日~8日、6月12日~22日に計測した。

(1) 水収支と植物重量

表-2に観測期間中に得られた土壌槽の水収支を示してある。裸地(C)と植栽された土壌槽(E, W)の水収支を比較すると、植栽された土壌槽の表面流出量は裸地の2.9~3.0倍、蒸発散量は2.1~2.2倍であり、植物による土壌槽の水収支への影響がいかに大きいかが分かる。また表-2には、植物の収穫時における根を含む総重量およびそれを空気乾燥させた重量を併示してある。これによると、トウモロコシの場合乾燥重量の202~192倍の水が消費されたことが明らかになる。なお、根群部の採取については、微細な根まで取り出すことは困難であり、若干土壌中に残ったが、これはやむをえないものと考えている。

表-2 水収支と植物重量

	Soil tank	E	W	C
Rainfall	(mm)	295.0	295.0	295.0
Irrigation	(mm)	75.0	75.0	75.0
Surface runoff	(mm)	51.9	50.8	151.8
Groundwater runoff	(mm)	72.4	61.6	86.5
Soil Storage	(mm)	-50.7	-54.3	-11.6
Evapo-transpiration, etc.	(mm)	296.4	311.9	143.4
Weight of corns	(kg)	8.60	8.66	-
Dry weight of corns	(kg)	1.54	1.54	-

(2) 茎内流量の計測結果とその妥当性

(6)式を用いて茎内流量を算定するためには、あらかじめ式中の定数、とくに k を求めておく必要がある。ここでは、 λ_s が得られていないので、6月1日~8日における q_f が0と考えられる夜間の温度データを用いて決定した。算出された λ_s は $0.052 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であった。表-3に k の算出に用いた各定数と計算で得られた k を示してある。 λ については、Sakurataniによるとほとんどの植物は $\lambda = 0.54 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ である⁶⁾。

表-3 算定された k の値と用いた定数

	Q(W)	A(cm ²)	r ₁ (cm)	r ₂ (cm)	k(W/K)
Jun. 1-8	0.414	4.71	1.82	2.42	0.058
Jun. 12-22	0.285	5.28	1.90	2.50	0.060

$L = 5 \text{ cm}$, $\lambda = 0.54 \text{ W/m K}$, $\lambda_s = 0.052 \text{ W/m K}$

表-4に2001年6月2日~6月4日、6月16日~6月18日の茎内流量と土壌槽Wの蒸発散量および深さ10cmの日平均土壌水分量を示す。また、図-5に2001年6月16日~6月18日における茎内流量と土壌槽Wの蒸発散量を示してある。なお、土壌槽Wの蒸発散量は 1 m^2 に9本植栽したものであることを考慮して、茎内流量は9倍してある。表-4を見ると、茎内流量 E_p は土壌槽Wにおける蒸発散量 ET と比較して少なく、施水を行った6月4日を除けば、その差($ET - E_p$)は土壌水分量 θ_{10} が小さくなるにつれて小さくなる傾向にあることが分かる。

これは土壌が乾燥するにつれて地表面からの蒸発量が減少していることを意味する。次に図-5より、早朝および夕方における低流量時の茎内流量計測結果はやや信頼性に欠けるが、昼間の茎内流量の波形は土壤槽Wにおける蒸発散量の変動と概ね同じ傾向を示しており、ここで試作した茎内流量測定装置および定数の算定法は妥当であると判断できる。

表-4 茎内流量と蒸発散量および可能蒸散・蒸発量の比較

	ET	Ep	ET-Ep	E'p	E's	Ep/E'p	θ ₁₀	IR
Jun. 2	6.80	5.34	1.46	5.32	1.03	1.00	0.122	0.00
Jun. 3	6.25	6.24	0.01	5.35	1.06	1.17	0.101	0.00
Jun. 4	7.00	6.12	0.88	5.47	0.87	1.12	0.090	5.00
Jun. 16	7.79	6.27	1.52	5.48	0.56	1.15	0.143	0.00
Jun. 17	8.20	7.30	0.90	7.68	0.58	0.95	0.121	0.00
Jun. 18	6.10	6.09	0.01	6.91	0.45	0.88	0.104	0.00

ET: Observed evapo-transpiration from soil tank W (mm/d), Ep: Sap flow (mm/d),
E'p: Potential Transpiration (mm/d), E's: Potential Evaporation (mm/d),
IR: Irrigation in soil tank W (mm/d),
θ₁₀: Daily average of water content at 10cm depth from soil surface in soil tank W

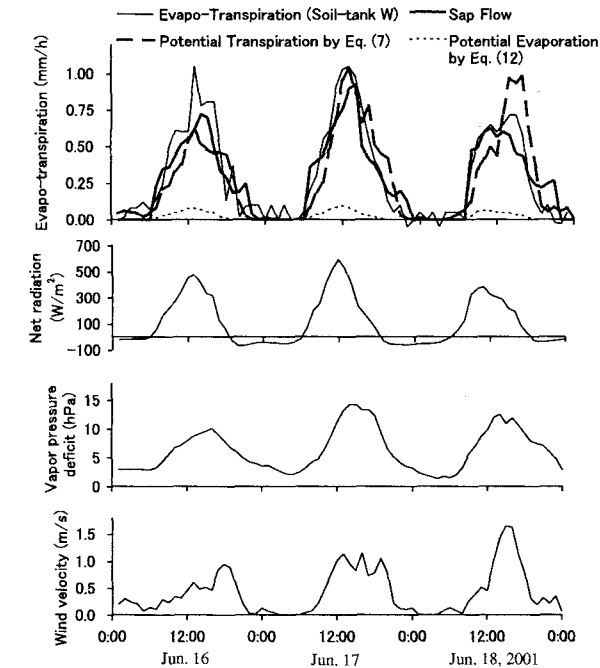


図-5 茎内流量と実蒸発散量および可能蒸散・蒸発量の変動

4. 蒸散量と可能蒸散量

可能蒸散量と茎内流量を比較し、蒸散抑制効果について検討する。Feddesらは可能蒸散量 E_p^* を、(7)式に示されるように、可能蒸発散量 E^* (気孔抵抗が無視できる完全湿面からの蒸発散量)と可能蒸発量 E_s^* の差としている⁸⁾。

$$E_p^* = E^* - E_s^* \tag{7}$$

地表面からの可能蒸発量 E_s^* の算出には、Ritchieが提案している経験式(8)が用いられる¹⁰⁾。

$$\lambda E_s^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n \exp(-0.398LAI) \tag{8}$$

ここに、 R_n : 純放射量、 Δ : 飽和水蒸気曲線の傾き、 γ : 乾湿計定数、 λ : 蒸発潜熱、 LAI : 葉面積指数である。

可能蒸発散量 E^* の算出には組み合わせ式(9)が用いられる。

$$\lambda E^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e) / r_a}{\Delta + \gamma} \tag{9}$$

ここに、 G : 地中伝熱量、 ρ : 空気の密度、 C_p : 空気の定圧比熱、 e_s , e : それぞれ飽和水蒸気圧、蒸気圧である。 r_a は空気力学抵抗で(10)式で計算される。

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 u(z)} \left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2 \tag{10}$$

ここに、 z : 地表面からの高さ、 d : 植物の成長とともに変化する z の修正量、 κ : カルマン定数(=0.4)、 u : 風速、 z_0 : 粗度長である。

植物の成長とともに変化する d , z_0 を求めることは容易ではないが、ここでは植物丈 h の関数としてそれぞれ(11), (12)式で表わすことにする。

$$d = ah \tag{11} \quad z_0 = bh \tag{12}$$

ここに、 a , b : 定数であり、それぞれ0.70, 0.10を用いた⁹⁾。植物丈および葉面積指数は図-3に示してあるそれぞれの成長曲線を用いる。(7)~(12)より、植物の成長を考慮した E^* , E_p^* , E_s^* を求めることが可能になる。すなわち、植物の成長初期においては h , LAI ともに0に近く、 $E^* \approx E_s^*$ ($E_p^* \approx 0$)となること、植物が成長するとともに h , LAI が増加し、 E_s^* が減少すること、 r_a が小さくなり E_p^* が増加することが説明できる。

図-5には計算結果より得られる可能蒸散量と可能蒸発量を併示してある。なお、これらの計算には図-5の下段に示してある純放射量、地表面から1.8mにおける飽差、風速を用いた。図-5の可能蒸散量の波形を見ると、6月16日、17日については茎内流量の変動と概ね一致している。6月18日については13時~16時の可能蒸散量は茎内流量および土壤槽Wの蒸発散量と大きく異なっている。6月16日~18日の茎内流量、可能蒸散量および気象条件を比較すると、純放射量および飽差の変動は茎内流量とほぼ同じ傾向にあるが、風速については茎内流量と異なる変動をしている。6月18日に限らず風速が大きい時間帯で可能蒸散量が茎内流量を上回ることから、蒸散抑制効果は風速に依存している、もしくは(9)式右辺第2項が過大に評価されていると考えられる。

表-4には可能蒸散量、可能蒸発量を併示してある。可能蒸散量は茎内総流量の0.88~1.17倍となり、両者はほぼ等しいことが分かる。深さ10cmの土壌水分量が0.09~0.14の範囲で変動している時には、根からの吸水が制限されることによる蒸散抑制効果はあまり大きくないと考えられる。

5. 土壌水流動解析

(1) 基礎式

(7)~(8)式で可能蒸散量および可能蒸発量を求めた後、Richards式(13)を用いて土壌水流動解析を行う。

$$C \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} - S \quad (13)$$

ここに、 K :不飽和透水係数、 ψ :圧力水頭、 C :比水分容量、 S :根の吸水強度である。

地表面からの蒸発量は(14)式で算出する。

$$E_s = \phi(\theta_0) E_s^* \quad (14)$$

ここに、 E_s :蒸発量、 ϕ :は0~1の値をとる表層土壌の水分量 θ_0 の関数である。

(2) 解析条件

計算領域は図-6に示された土壌槽の鉛直2次元断面とし、有限要素法を用いて解析を行う。土壌物理特性については図-2に示された関係を用いるが、地表面には難透水性被膜が形成されたため、表層1cmの透水係数は図-2の示されている0.05倍を用いて計算を行う¹¹⁾。境界条件として、領域下端は地下水面、上端は浸透量もしくは(14)式で算出される蒸発量が与えられる。(14)式の $\phi(\theta_0)$ については図-7を用いる。なお、図-7は、裸地の条件(可能蒸散量 $E_p^* = \Delta / (\Delta + \gamma) R_n$ 、蒸散量なし)を与えて(13)式を数値的に解析し、計算結果の蒸発量と裸地(土壌槽C)の蒸発量が一致するように決定された。根の吸水量は蒸散量と等しいとみなして、(13)式の吸水強度 S を(15)式で算出する。

$$S = \begin{cases} E_p/3Bl & \text{根群域内} \\ 0 & \text{根群域外} \end{cases} \quad (15)$$

E_p は蒸散量であり、前述の考察結果より、可能蒸散量と等しいとする。 B は土壌槽の幅を1とした時の植物1個体における根群域の幅で0.15とした。 l は根群域の深さであり、植栽時および収穫時に計測したところそれぞれ12、30cmであった。解析では、 l は10cmから30cmまで図-3に示してある乾燥重量の成長曲線を用いて変化させた。ただし、表層土壌では根からの吸水はないものとする。

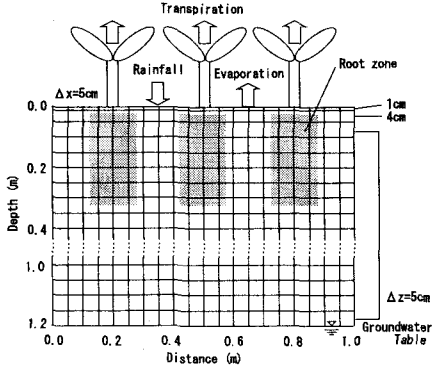


図-6 解析領域と条件

(3) 解析結果

図-8に2001年5月3日~7月9日のトウモロコシが植栽された土壌槽の解析結果と観測結果の比較を示して

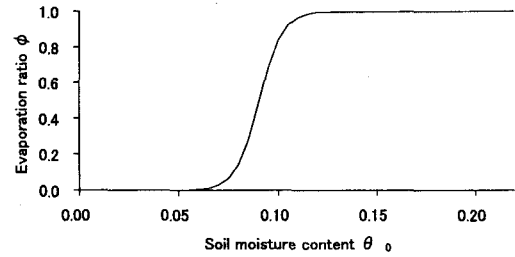


図-7 土壌水分量と蒸発量の関係

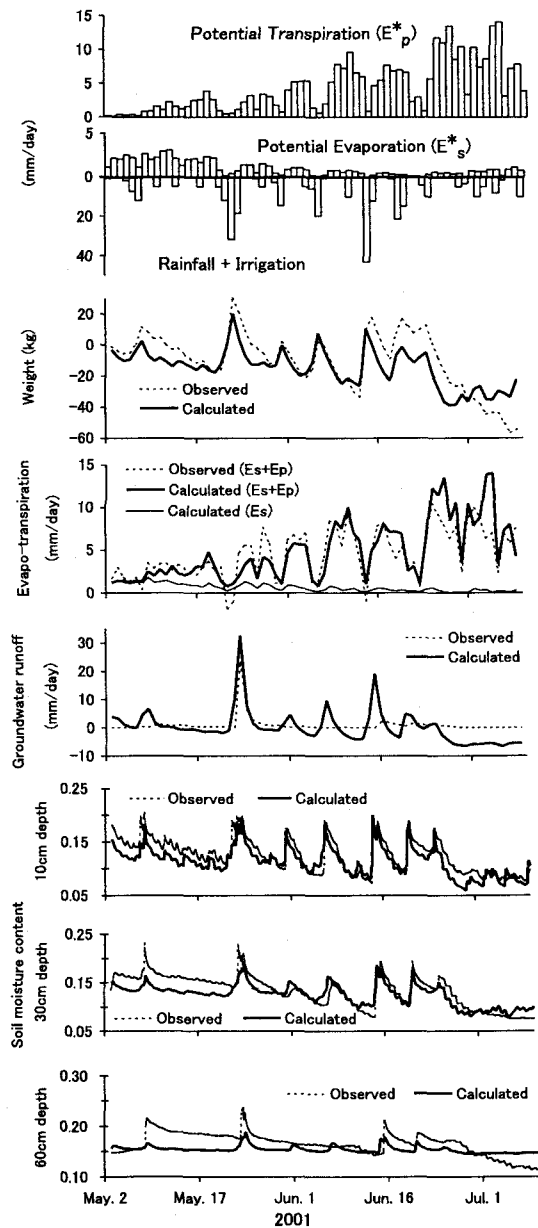


図-8 解析結果と観測結果の比較

ある。なお、図中の土壌槽重量は計算開始時を0として、地下水流出量は解析領域内から領域外への流出を正、領域外から領域内への流入を負として示してある。

地下水流出量を見ると、6月25日以降において蒸散量が過大に算出されたために土壌水分が毛管上昇し、地下水流出量が常に負となっている。これは、6月25日以降における深さ10cmの土壌水分量が観測結果、解析結果ともに0.09より小さいことから、実際には蒸散量が可能蒸散量と等しいという仮定が成立せず、吸水制

限・蒸散抑制作用が生じたと考えられる。5月3日から6月25日までのについては、槽重量、蒸発散量、地下水流出力および土壌水分量ともに計算結果は観測結果をうまく再現しており、ここで示した手法および仮定の妥当性が一応認められる。

5月3日～7月9日における蒸発散量は、観測結果が312mmに対して解析結果は330mmであり、6%過大に算出された。解析結果の蒸発散量の内訳は蒸散288mm、地表面からの蒸発が42mmで、それぞれ蒸発散量の87.3%、12.7%であり、地表面からの蒸発量は蒸散量と比較して小さいことが分かる。図-9に(a)2001年5月14日13時と(b)6月12日14時における地表面から深さ50cmまでの圧力と流速の分布が示してある。なお、根群域の深さは(a)、(b)それぞれ15、30cmである。(a)(b)ともに根からの吸水により下方の土壌水が吸い上げられており、その量は蒸散量が多いほど大きい。また、晴天時における根群域外から内への土壌水分移動量は根群域の側方よりも下方からが多いことが分かる。これは、地表面から深くなるほど土壌水分量が多く、透水係数が大きくなるためと考えられる。根群域間の土壌水流动については、(a)では根の吸水量が少なく地表面からの蒸発が比較的大きいため鉛直上方への流れが見られるが、(b)では根の吸水量が多いためほぼ水平方向に流動が生じ、土壌下方から地表面への水分移動はほとんど見られない。地上部では葉が増加して地表面に到達する純放射量を遮断していることを合わせて考えると、植物が成長するとともに地表面からの蒸発量は相乗的に減少していると考えられる。

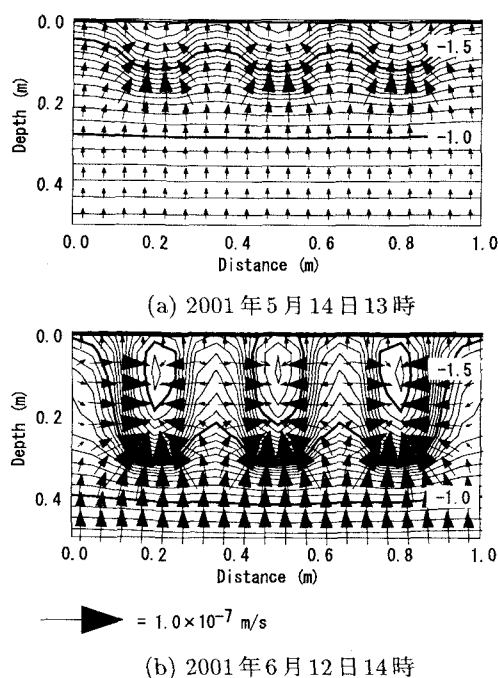


図-9 等圧力線と流速ベクトル

6. 結論

本研究ではSHB法による茎内流量の計測を試み、計測結果を用いて植物の蒸散特性について検討した。さ

らに、それを応用して植物の成長と蒸散・地表面蒸発を考慮した鉛直2次元土壌水流动解析を行った。本研究で得られた結論を要約すると次のとおりである。

- 成長にともなって茎径が変化する植物の茎内流量を簡便に計測するために、SHB法が有用であることが示された。さらに、茎内流量は蒸散特性を明らかにするために有力な手法となることが分かった。
- 深さ10cmにおける日平均土壌水分量が0.09～0.14の場合、茎内流量と可能蒸散量はほぼ一致し、蒸散抑制がほとんど生じていない。
- 植物の成長を考慮した蒸発散量推定・鉛直2次元土壌水流动解析を行った。計算結果は観測結果をうまく再現した。
- 蒸散量および地表面からの蒸発量はそれぞれ蒸発散量の87.3%、12.7%であった。地表面からの蒸発量は蒸散量と比較して小さい。
- 植物が成長するとともに、土壌中では根の吸水量の増加により土壌下方から地表面への水分供給量が減少し、さらに地上部では葉面積の増加により地表面に到達する純放射量が遮断されるため、地表面からの蒸発量は相乗的に減少することが明らかになった。

参考文献

- Mohr, H., Schopfer, P. 原著, 網野 真一・駒嶺 穆 監訳: 植物生理学, シュプリングァーフェアラーク東京株式会社, pp. 1 - 598, 1999.
- 岡 太郎・野口 美具: 不飽和浸透流の拡散係数と透水係数の測定, 第24回水理講演会論文集, pp. 363 - 368, 1980.
- Vikki L. Grime, James I.L. Morison and Lester P. Simmonds: Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method, *Agric. For. Meteorol.*, Vol.74, pp.1-25, 1995.
- 吉田 弘・端野 道夫: 大型ウエイティングライシメータによる材木蒸散量計測の試み, 水工学論文集, 第43巻, pp. 66-72, 1999.
- Sakuratani, T.: A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants, *J. Agric. Meteorol. (Japan)*, Vol.40, pp.273-277, 1981.
- Sakuratani, T.: Improvement of the probe for measuring water flux in the stem of intact plants with the stem heat balance method, *J. Agric. Meteorol. (Japan)*, Vol.34, pp.177-187, 1984.
- V. L. Grime and F. L. Sonclair: Source of error in stem heat balance sap flow measurements, *Agric. For. Meteorol.*, 94, pp.103-121, 1999.
- R.A.Feddes, E.Bresler and S.P.Neuman: Field Test of Modified Numerical Model for Water Uptake by Root Systems, *Water Resour. Res.*, Vol. 10, No. 6, pp. 1199-1206, 1974
- 塚本 良則 編: 森林水文学, 文永堂出版株式会社, pp. 1-319, 1992.
- Joe T. Ritchie: Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, *Water Resour. Res.*, Vol. 8, No. 5, pp.1204-1213, 1972.
- 岡 太郎・角屋 睦: 裸地斜面域における雨水の浸入と地下水流出(2) -流出モデルへのアプローチ-, 京都大学防災研究所年報, pp. 523 - 533, 1974.

(2001. 10. 1受付)