

ウェイングラシメータにおける トウモロコシの蒸発散

— 植物の成長と水文素過程に関する基礎研究 —

東 博紀¹・岡 太郎²

¹学生会員 工修 京都大学工学研究科土木システム工学専攻(〒 606-8501 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教授(〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

本研究では、植物の成長が蒸発散に及ぼす影響を明らかにするため、ウェイングラシメータによる水収支観測およびstem heat balance methodによる茎内流量計測を行った。その結果、トウモロコシを植栽したライシメータの蒸発散量は裸地の場合の2.1~2.2倍、トウモロコシの生育には植物体乾燥重量の192~295倍の水が必要であることが分かった。さらに、茎内流量を用いてライシメータの蒸発散量を蒸散量と地表面からの蒸発量に分離し、植物の乾燥重量、丈、葉面積と蒸散・蒸発量の関係を明らかにした。風速および土壌の乾燥が蒸発散量に及ぼす影響を吟味した後、植物の成長、土壌水分量、気象条件によって変化する蒸発散量を推定する数理モデルを構築した。本モデルをライシメータに適用したところ、蒸発散量の計算値は観測値をうまく再現した。

Key Words : plant growth, evapotranspiration, weighing lysimeter, sap flow, soil moisture content

1. 研究目的

近年、異常気象や人口増加を要因とする水不足が世界各地で問題となっており、水資源の有効利用の重要性が増している。水資源を効率的に管理するためには、流域における水循環機構を明確にし、流域水収支を定量的に評価することが必要である。

蒸発散は流域の水収支を考えるうえで重要な水文素過程のひとつである。自然丘陵地や農地などの蒸発散は植物葉面からの蒸散と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や生育状況、気象条件および土壌水分状態によって大きく変化する。これまでに蒸発散推定手法は多数提案されているが、現地における蒸発散量の直接計測が困難であるため、それらの妥当性の検証が十分でないことは多くの研究者が認めるところである¹⁾。

この種の問題にアプローチするために、我々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水収支観測を行った。また、植物の蒸散特性を明らかにするため、stem heat balance method (SHB法) による植物の茎内流量計測を行った。ここでは、まずこれら観測の内容およびその結果について記す。次に、茎内流量を蒸散量と等しいものと見なしてライシメータの蒸発散量を蒸散量と地表面からの蒸発量に分離し、植物の乾燥重量、丈、

葉面積の変化が蒸散・蒸発量に及ぼす影響を検討する。風速および土壌の乾燥と蒸発散量の関係に吟味を加えた後、植物の成長、土壌水分量、気象条件を考慮した蒸発散モデルを提示する。最後に、本モデルをトウモロコシが植栽されているライシメータに適用し、モデルの妥当性を議論する。

2. 観測の内容と結果

(1) ウェイングラシメータを用いた水収支観測

a) 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1.0m、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。ここでは、写真-1に示される左側手前の土壌槽をE(east)、中央をC(center)、右側奥をW(west)と呼称することにする。

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(比重2.63、間隙率0.36)で充填されている。各土壌槽にはamplitude domain reflectometry(ADR)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降雨によって発生する表面流を集

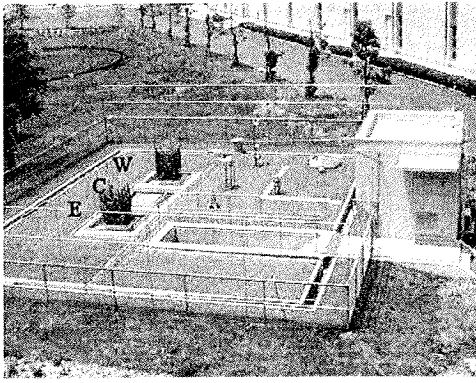


写真-1 ウェインライシメータ

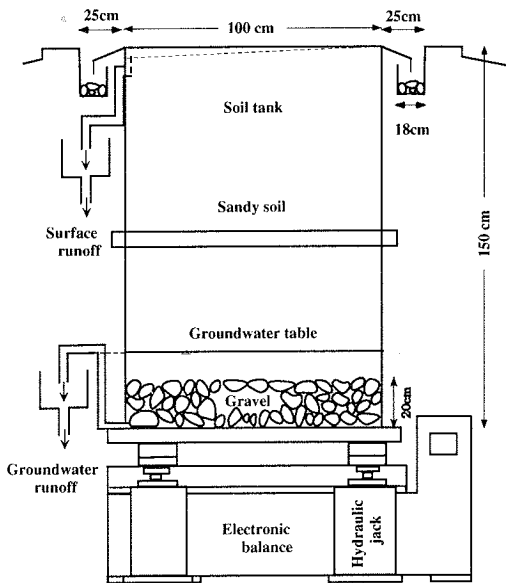


図-1 土壌槽の構造

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の転倒桁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。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の転倒桁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。

b) 観測結果

2001年5月3日～7月9日には土壌槽EとWに、2002年6月10日～8月14日にはEにトウモロコシを9本植

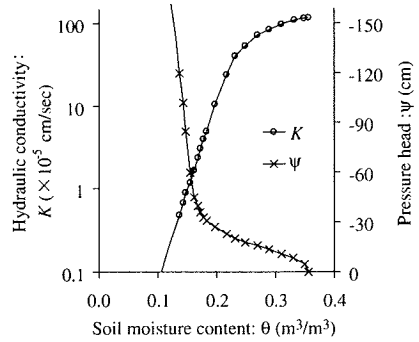


図-2 充填土壌の物理特性²⁾

表-1 気象要素の観測項目・機器の性能

Element	Instrument	Resolution	Notes
Rainfall rate	Tipping bucket rainfall gauge	0.5mm per 1 tipping	
Net radiation	Net radiometer	35mV kW ⁻¹ m ²	
Solar radiation	Pyranometers	7mV kW ⁻¹ m ²	
Air temperature and vapor pressure	Platinum resistance psychrometer	±0.5K	1.80, 0.90, 0.45m above the ground surface
Wind velocity	Cup anemometer	0~75m/s	1.85, 0.95, 0.50m above the ground surface
Soil temperature	Platinum resistance thermometer	-10~70°C	5, 15, 25cm below the ground surface
Soil heat flux	Heat flow sensor	20mV kW ⁻¹ m ²	5, 15, 25cm below the ground surface
Evaporation	Class A pan (Diameter 120cm)	±1mm	

表-2 水収支観測結果

	2001 May 3~Jul. 9			2002 Jun. 10~Aug. 14
	E	W	C	E
Soil tank				
Crop density (plant / m ²)	9	9	0	9
Weight of corns (kg)	8.60	8.66	-	5.32
Dry weight of corns (kg)	1.54	1.54	-	1.27
Dry weight of caryopses (kg)	0.30	0.31	-	0.20
Rainfall (mm)	295.0	295.0	295.0	269.0
Irrigation (mm)	75.0	75.0	75.0	140.0
Surface runoff (mm)	51.9	50.8	151.8	47.1
Groundwater runoff (mm)	72.4	61.6	86.5	42.3
Soil storage (mm)	-50.7	-54.3	-11.6	-55.1
Evapotranspiration, etc. (mm)	296.4	311.9	143.4	374.7

栽して水収支観測を行った。なお、2001年5月3日～7月9日のCは比較のため裸地の状態で観測を行った。地下水位は2001年5月3日～7月9日には地表面から深さ1.20mに設定されたが、2002年6月10日～8月14日の観測では土壌槽内に地下水面を設けず、余剰の土壌水を重力排水した。

表-2に各土壌槽におけるトウモロコシの植栽密度および観測期間中に得られた水収支および植物の収穫時における根を含む総重量、それを空気乾燥させた重量および穀果の乾燥重量を示してある。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。

本ライシメータでは周囲と孤立した植生の蒸発散量を計測していることになり(写真-1), その測定値は圃場など様な植被状態の蒸発散量よりも大きくなるといわれている。また、植物の成長は気象、施肥、土壌水分、土質および植栽密度など多くの条件に左右されることが知られている。したがって、ここで得られたトウモロコシの成長および水収支の観測結果はそのことに注意を要するが、次のことが明らかになる。裸地(2001年C)と植栽した土壌槽(2001年E, W)の水収支を比較すると、裸地の表面流出量は植栽した土壌槽の2.9~3.0倍、植栽した土壌槽の蒸発散量は裸地の2.1~2.2倍であり、植物による土壌槽の水収支への影響はかなり大きい。また、トウモロコシの場合、根・茎・葉を含む植物体の全乾燥重量および穀果乾燥重量それぞれ1kg生産するために192~295kg, 988~1873kgの水が蒸発散によって消費される。

(2) 植物の成長の計測

植物の成長と蒸発散量の関係を表わすためには、植物の成長を定量的に表示することが必要である。的確にトウモロコシの成長を評価するには、土壌槽に植栽したトウモロコシを採取し、葉面積、乾燥重量、植物丈等を計測することが最も適切な方法である。しかし、ライシメータに植栽されている植物を採取した場合、その後の観測は継続できなくなる。

本研究では、ライシメータ付近に試験圃場を設け、トウモロコシを120本育成するとともに定期的に2・3本採取し、各個体の丈、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。採取する個体についてはライシメータに植栽されている植物の葉数、丈、雌軸数がほぼ一致するものを選別した。なお、試験圃場では、トウモロコシを土壌槽と同様に1m²あたり9本になるように植栽し、施肥は、1m²あたりの施肥量が土壌槽のそれと等しくなるように行った。

図-3(a)~(c)に2001年5月3日~7月9日、2002年6月10日~8月14日の根を含むトウモロコシの乾燥重量、丈および葉面積の計測結果をそれぞれ示す。なお、図中の乾燥重量、丈、葉面積はそれぞれの計測で得られた最大値で除して無次元化し、時間については植付け日を0としてある。また、図中には1965年にKimballが提案したトウモロコシの乾燥重量の成長曲線³⁾を併示してある。図-3(a)を見ると、2001年と2002年の乾燥重量の計測値およびKimballによる成長曲線はよく一致している。植物丈(b)および葉面積(c)についても2001年と2002年の計測値は一致している。

植物の成長は式(1)のロジスティック成長曲線で表わ

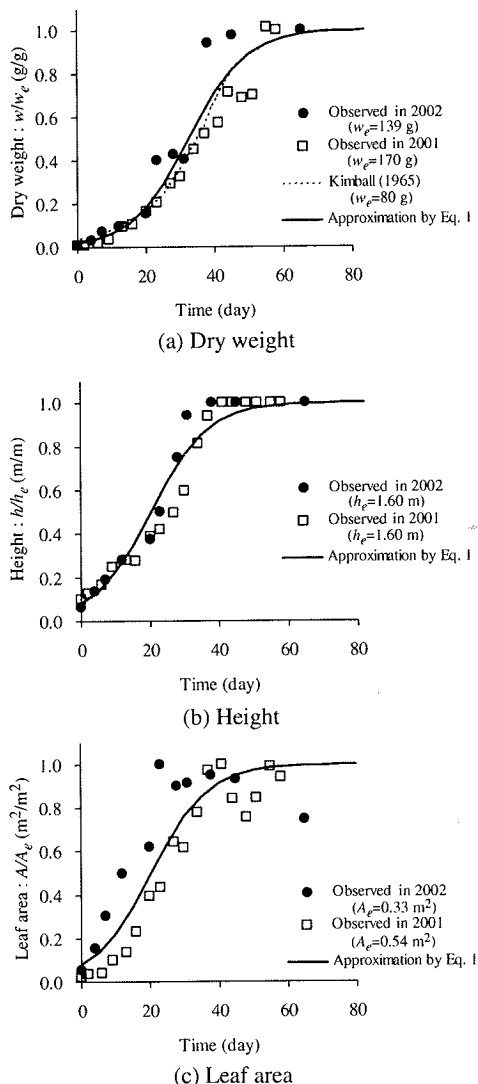


図-3 トウモロコシ1個体の成長

される³⁾。

$$\frac{M}{M_e} = \left\{ 1 + \left(\frac{M_e}{M_0} - 1 \right) \exp(-rt) \right\}^{-1} \quad (1)$$

ここに、 M : 乾燥重量(植物丈、葉面積)、 M_e : M の最大値、 t :時間(s)、 r :成長率(s^{-1})、 M_0 : $t=0$ 時の M である。図-3には式(1)を用いた計算結果を併示してある。これにより、乾燥重量では $r = 0.12\text{day}^{-1}$ 、 $M_0 = 0.02M_e$ 、植物丈では $r = 0.12\text{day}^{-1}$ 、 $M_0 = 0.08M_e$ 、葉面積では $r = 0.12\text{day}^{-1}$ 、 $M_0 = 0.06M_e$ という値が得られた。

ここで得られた r 、 M_0 、 M_e は本研究の観測条件下のものであるといわざるをえず、気象、施肥、土壌水分、土質および植栽密度など多くの条件によって変化することは十分考えられる。また、試験圃場における群落

状態の植物の成長とライシメータにおける周辺と孤立した状態のそれとは異なることがこれまでの研究で指摘されているが、これについては植物体の諸元を測定して式(1)の適用性を検討することに限定すれば、特に問題は無いものと考えている。

(3) 茎内流量計測

a) Stem heat balance method(SHB法)

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⁴⁾。本研究では茎を損傷させることなく計測が可能なstem heat balance method(SHB法)⁵⁾を採用した。SHB法は、茎の一部を加熱し、加熱した部位の熱収支より茎内流量を算定する方法である。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 $Q(\text{J s}^{-1})$ としたとき、式(2)~(6)に示してある熱収支式が成立する。

$$Q = q_f + q_u + q_d + q_r \quad (2)$$

$$q_f = c_w F (T_b - T_c) \quad (3)$$

$$q_u = \lambda A (T_b - T_a) / \Delta x \quad (4)$$

$$q_d = \lambda A (T_c - T_d) / \Delta x \quad (5)$$

$$q_r = \frac{2\pi\lambda_s L (T_e - T_f)}{\ln(r_2/r_1)} = k (T_e - T_f) \quad (6)$$

ここに、 q_f : 茎内流によって輸送される熱量(J s^{-1})、 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(J s^{-1})、 q_r : 周囲の断熱材を通して空气中に失われる熱量(J s^{-1})、 F : 茎内流量(g s^{-1})、 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(K)、 A : 茎の横断面積(m^2)、 λ , λ_s : それぞ

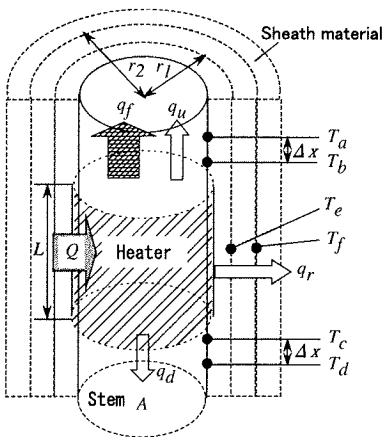


図-4 茎内流量計測の概要(SHB法)

れ茎、断熱材の熱伝導率($\text{J m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 L : ヒータの幅(m)、 Δx , $r_{1,2}$: それぞれ図-4に示してある距離(m)、 $k = 2\pi\lambda_s L / \ln(r_2/r_1)$ である。式(2)~(6)を茎内流量 F についてまとめると式(7)を得る。

$$F = \frac{Q - \lambda A (T_b - T_a + T_c - T_d) / \Delta x - k (T_e - T_f)}{c_w (T_b - T_c)} \quad (7)$$

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、 $T_b = T_c$ となり式(7)は成立しない。また、低流量時は $T_b \approx T_c$ となるため、そのまま式(7)を用いると茎内流量は過大に算出される傾向にあることが知られている。ここでは、Grime and Sonclair⁶⁾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。

b) 計測結果

2001年6月1~8日、6月12~22日、2002年6月23~30日、7月12日~8月13日にトウモロコシの茎内流量を測定した。茎内流量の算出に用いた定数を表-3に示す。 λ はほとんどの植物茎において $0.54 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であると言われている⁷⁾。 λ_s には、測定した結果より、 $0.055 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ を用いた。

表-4に2001年6月2・3日、6月16~18日、2002年6月26~28日、7月20~24日、8月2・3日、8月5~9日、8月11~13日の7期間における茎内流量($E_{pobs.}$)およびトウモロコシを9本植栽した土壌槽(2001年はW、2002年はE)の蒸発散量($ET_{obs.}$)の観測値を示す。

表-4より、茎内流量($E_{pobs.}$)は蒸発散量($ET_{obs.}$)より小さいことが分かる。茎内流量は蒸散量と等しいと見なすと、茎内流量と蒸発散量の差は地表面からの蒸発量と考えられる。表-4には土壌槽における深さ10cmの日平均土壌水分量(θ_{10})、土壌槽の蒸発散量と茎内流量の差より求めた地表面からの蒸発量($E_{sobs.}$)および蒸発散量に対する地表面からの蒸発量の割合($E_{sobs.}/ET_{obs.}$)を併示してある。同じ期間内において、 $E_{sobs.}/ET_{obs.}$ は土壌水分量 θ_{10} が減少するにつれて小さくなることが分かる。これは、土壌が乾燥するにつれて地表面から

表-3 茎内流量の算定に用いた定数

	$Q(\text{J/s})$	$A(\text{cm}^2)$	$r_1(\text{cm})$	$r_2(\text{cm})$	$k(\text{J/s K})$
Jun. 1-8, 2001	0.414	4.71	1.82	2.42	0.060
Jun. 12-22, 2001	0.285	5.28	1.90	2.50	0.063
Jun. 23-30, 2002	0.221	2.14	1.43	2.03	0.049
Jul. 12-31, 2002	0.221	2.49	1.49	2.09	0.051
Aug. 1-13, 2002	0.221	2.49	1.51	2.11	0.052

$L = 5\text{cm}$, $\lambda = 0.54 \text{ J/s m K}$, $\lambda_s = 0.055 \text{ J/s m K}$, $\Delta x = 1.5\text{cm}$

表-4 茎内流量と蒸発散量の比較

		<i>h</i>	<i>LAI</i>	<i>P</i>	θ_{10}	Θ	$ET_{obs.}$	$E_{p\ obs.}$	$E_{s\ obs.}$	$E_{s\ obs.}/ET_{obs.}$	<i>ET</i>	E_p	E_s
2001	Jun. 2	0.90	3.0	9.9	0.12	0.13	6.8	5.4	1.4	0.21	6.6	5.4	1.2
	Jun. 3			10.1	0.10	0.12	6.3	6.3	0.0	0.00	5.6	5.3	0.3
	Jun. 16	1.60	4.3	10.0	0.14	0.15	7.8	6.2	1.6	0.20	7.1	5.7	1.4
	Jun. 17			9.7	0.12	0.14	8.2	7.2	1.0	0.12	7.9	7.0	0.9
	Jun. 18			9.3	0.10	0.12	6.1	6.1	0.0	0.00	6.3	6.1	0.2
2002	Jun. 26	0.65	1.7	8.7	0.15	0.15	3.2	1.6	1.6	0.50	2.6	1.3	1.3
	Jun. 27			9.3	0.14	0.15	2.6	1.4	1.2	0.46	2.6	1.6	1.0
	Jun. 28			9.8	0.12	0.14	5.5	4.0	1.5	0.26	4.8	3.0	1.7
	Jul. 20	1.60	2.8	11.3	0.15	0.17	8.6	6.7	1.9	0.22	9.2	6.9	2.3
	Jul. 21			10.9	0.14	0.15	10.1	8.0	2.1	0.21	10.6	8.4	2.3
	Jul. 22			10.4	0.12	0.14	8.9	7.9	1.0	0.11	8.3	7.1	1.2
	Jul. 23			9.9	0.11	0.13	9.2	8.0	1.2	0.14	7.1	6.3	0.8
	Jul. 24			9.4	0.10	0.11	9.2	8.3	0.9	0.10	7.4	7.0	0.5
	Aug. 2	1.60	2.5	5.1	0.11	0.11	5.0	4.5	0.5	0.10	5.5	5.0	0.5
	Aug. 3			4.7	0.11	0.11	6.8	5.3	1.5	0.22	5.3	4.8	0.5
	Aug. 5	1.60	2.4	4.0	0.15	0.16	10.0	6.0	4.0	0.40	10.1	7.4	2.7
	Aug. 6			3.6	0.13	0.14	8.1	6.0	2.1	0.26	8.4	6.6	1.9
	Aug. 7			3.3	0.12	0.13	7.4	5.7	1.7	0.23	8.3	7.0	1.3
	Aug. 8			3.0	0.11	0.12	5.5	4.5	1.0	0.18	5.8	5.1	0.7
	Aug. 9			2.8	0.11	0.11	4.1	3.5	0.6	0.16	4.5	3.9	0.5
	Aug. 11			2.3	0.13	0.13	6.9	3.8	3.1	0.45	6.1	4.4	1.7
	Aug. 12			2.1	0.13	0.13	3.9	1.8	2.1	0.54	3.0	1.8	1.2
Aug. 13	1.9	0.13	0.13	6.1	2.7	3.4	0.56	5.5	3.4	2.1			

h: Observed results of crop height (m), *LAI*: Observed results of leaf area index (m²/m²), *P*: Increase in dry weight of corns per unit leaf area (g/day m²), θ_{10} : Soil moisture content at 10cm deep in Soil-tank W in 2001/E in 2002 (m³/m³), Θ : Soil moisture content in root zone (m³/m³), *ET_{obs.}*: Observed evapotranspiration at Soil-tank W in 2001/E in 2002 (mm/day), $E_{p\ obs.}$: Observed transpiration (= sap flow, mm/day), $E_{s\ obs.}$: Observed evaporation from soil surface (= $ET_{obs.} - E_{p\ obs.}$, mm/day), *ET*: Calculated evapotranspiration (= $E_p + E_s$, mm/day), E_p and E_s : Calculated transpiration and evaporation, respectively (mm/day).

の蒸発量が減少することを示している。

3. 植物の成長を考慮した蒸発散モデル

(1) 蒸発散推定式

蒸発散量を推定する手法としてPenman-Montieth式⁸⁾(8)がある。

$$ET = \phi \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} + \frac{\rho C_p (e_s - e)}{l(\Delta + \gamma)} \right\} \quad (8)$$

ここに、*ET*: 蒸発散量 (m s⁻¹), *R_n*: 純放射量 (J s⁻¹ m⁻²), Δ : 飽和水蒸気圧曲線の傾き (Pa K⁻¹), γ : 乾湿計定数 (Pa K⁻¹), *l*: 蒸発潜熱 (J m⁻³), *G*: 地中伝熱量 (J s⁻¹ m⁻²), *e_s*, *e*: それぞれ飽和水蒸気圧 (Pa), 蒸気圧 (Pa), ρ : 空気の密度 (g m⁻³), *C_p*: 空気の定圧比熱 (J g⁻¹ K⁻¹), *r_a*: 空気力学抵抗 (s m⁻¹), ϕ : 式(9)で表わされる0~1の値をとる無次元定数である。

$$\phi = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (9)$$

ここに、*r_c*: 気孔抵抗 (s m⁻¹) である。Penman-Montieth法は気象条件および植物の気孔の開閉による蒸散への影響が考慮されているが、気孔抵抗の評価が困難であることが課題として残されている。

土壌が十分に湿っているとき、気孔抵抗は無視され、式(8)は式(10)となる。

$$ET^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} + \frac{\rho C_p (e_s - e)}{l(\Delta + \gamma)} \quad (10)$$

ここに、*ET**: 気孔抵抗が無視できる蒸発散量 (m s⁻¹) であり、ここでは可能蒸発散量と呼ぶことにする。Penman法⁹⁾では、式(10)の右辺第2項が風速に依存する経験式を用いて表わされる。

$$ET^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(e_s - e) \quad (11)$$

ここに、*f*: 風速関数 (m Pa⁻¹ s⁻¹) である。

Penman-Monteith法およびPenman法は蒸発散量を算出する手法であり、葉面からの蒸散量と地表面からの蒸発量を分離して算定することはできない。本研究で提示する蒸発散モデルでは、後述する式(13)~(16)より植物葉面からの蒸散量と地表面からの蒸発量を算出する。

Feddes *et al.*¹⁰⁾は、可能蒸発散量 *ET** を可能蒸散量 E_p^* (気孔抵抗が無視できる蒸散量, m s⁻¹) と可能蒸発量 E_s^* (十分に湿った土壌からの蒸発量, m s⁻¹) の和としている。

$$ET^* = E_p^* + E_s^* \quad (12)$$

地表面からの可能蒸発量 E_s^* の算出には、地表面に到達する日射量が植物の葉面積の増加によって小さくなることを考慮した式(13)を用いる¹¹⁾。

$$E_s^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \exp(-\alpha LAI) \quad (13)$$

ここに、 LAI : 葉面積指数 ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)、 α : 吸光係数 (dimensionless) である。これは有効放射量 $R_n - G$ が地表面と葉面に $\exp(-\alpha LAI)$ 対 $\{1 - \exp(-\alpha LAI)\}$ で配分されていることを示している。

式(11)~(13)より、可能蒸散量 E_p^* は式(14)で算出される。

$$E_p^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \{1 - \exp(-\alpha LAI)\} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(e_s - e) \quad (14)$$

土壌が乾燥すると地表面からの蒸発量および葉面からの蒸散量は減少することが知られている。ここでは、蒸散量 E_p および地表面からの蒸発量 E_s をそれぞれ(15)、式(16)で表わす。

$$E_p = \phi_p(\theta) E_p^* \quad (15)$$

$$E_s = \phi_s(\theta) E_s^* \quad (16)$$

ここに、 ϕ_p 、 ϕ_s : 0~1の値をとる無次元定数であり、ここではそれぞれ蒸散係数、蒸発係数と呼ぶことにする。

(2) 植物の成長および土壌の乾燥が及ぼす地表面からの蒸発量への影響

a) 蒸発係数と土壌水分量

表層が乾燥すると土壌水が減少して透水係数が極端に小さくなり、セルフマルチ(自己覆い)が形成されるため、地表面の蒸発は抑制される¹²⁾。したがって、蒸発係数は表層土壌の含水量に依存する関数であると考えられる。ここでは、ADR土壌水分計で測定できる地表面に最も近い深さ10cmにおける土壌水分量と蒸発係数の関係を調べた。裸地(2001年土壌槽C)における蒸発量 E_s 、式(13)より得られる E_s^* を式(16)に代入して算出した蒸発係数 ϕ_s を深さ10cmにおける日平均土壌水分量 θ_{10} についてプロットすると図-5が得られた。なお、式(13)中の LAI は裸地であるため0である。 ϕ_s と θ_{10} の関係は図中の曲線式(17)で近似できる。

$$\phi_s(\theta_{10}) = \left[1 + \exp \left\{ -35 \left(\frac{\theta_{10} - \theta_i}{\theta_s - \theta_i} \right) + 11 \right\} \right]^{-1} \quad (17)$$

ここに、 θ_s 、 θ_i : それぞれ0.36、0.01である。

b) 吸光係数と植物の葉面積

吸光係数 α を2001年6月16~18日の地表面からの蒸発量 $E_{s,obs}$ と(13)、(16)および式(17)を用いて算出される蒸発量 E_s が等しくなるように求めたところ、 $\alpha = 0.16$ を得た。表-4には $\alpha = 0.16$ を用いて推定した蒸発量 E_s を併示してある。地表面からの蒸発量の推定値 E_s は観

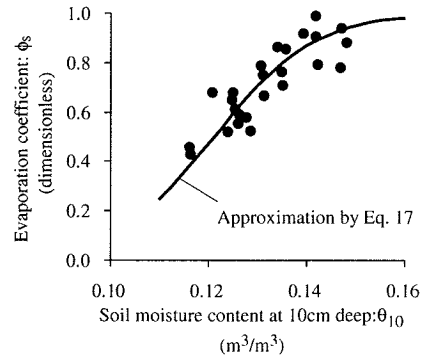


図-5 蒸発係数と深さ10cmの土壌水分量の関係

測値 $E_{s,obs}$ と概ね一致しており、 α は妥当であると判断できる。

(3) 植物の成長および土壌の乾燥が蒸散量に及ぼす影響

a) 植物丈と風速関数

風速、気温、湿度の鉛直分布が空間的に一様であり、空気の運動量、熱、水蒸気は乱流拡散するとき、風速関数 f は式(18)で算出される。

$$f = \frac{\rho C_p}{\gamma l} \frac{\kappa^2 u(z)}{[\ln \{(z-d)/z_0\}]^2} \quad (18)$$

ここに、 z : 地表面からの高さ (m)、 $u(z)$: 地表面からの高さ z における風速 (m s^{-1})、 κ : Karman 定数 (dimensionless)、 d : z の修正量 (m)、 z_0 : 粗度長 (m) である。 d および z_0 の算出にはそれぞれ式(19)、(20)がよく用いられる¹³⁾。

$$d = mh \quad (19)$$

$$z_0 = nh \quad (20)$$

ここに、 h : 植物丈 (m)、 m 、 n : 経験定数 (dimensionless) である。畑地作物では m 、 n にそれぞれ0.7、0.1¹³⁾ がよく用いられるが、これらの値は風速によって変化することが知られている¹⁴⁾。

一方、Penman⁹⁾は土壌水が十分ある芝生の蒸発散量に基づいて式(21)で表わされる風速関数を提案している。

$$f(u_2) = 0.14u_2 + 0.26 \quad (\text{mm day}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (21)$$

ここに、 u_2 : 地表面から高さ2mの風速 (m s^{-1}) である。式(11)、(21)を用いたPenman法は土壌水が十分にある丈が低い植物および裸地の蒸発散量を精度よく算定するが、丈の高い植物の蒸発散量については過小評価することが知られている。その問題に対して多くの研究者が風速関数の修正を試みており、式(22)、(23)で

表わされる風速関数を提案している。

$$f = au + b \quad (22)$$

$$f = au^b \quad (23)$$

ここに、 a 、 b ：経験定数である。式(18)と式(22)の風速関数はともに風速の一次関数であり、式(18)は式(22)の a 、 b を乱流理論を用いて決定したものと位置付けることができる($a = rC_p k^2 / \gamma \lambda \{ \ln \{ (z-d)/z_0 \} \}^2$, $b = 0$)。

上述のように風速関数の評価方法についてはいまだ確立されていないと考えられるため、ここでは観測結果を用いて植物の成長、風速および風速関数の関係について検討する。風速関数は、式(14)、(15)より、式(24)で算出できる。

$$f = \frac{\Delta + \gamma}{\gamma(e_s - e)} \left[\frac{E_p}{\phi_p} - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \{ 1 - \exp(-\alpha LAI) \} \right] \quad (24)$$

まず、式(24)を用いて植物丈1.60mのときの風速関数を次の方法で調べた。表-4に併示してある根群域の土壌水分量 Θ が大きい2001年6月16日および2002年7月20~21日の蒸散係数 ϕ_p を $1(E_p^* = E_p)$ と仮定し、2001年6月16日および2002年7月20~21日の茎内流量の計測結果を式(24)中の E_p に代入して植物丈1.60mの風速関数を求めた。なお、ここでは茎内流量は蒸散量と等しいと見なし、根群域の土壌水分量 Θ は、収穫時に根群域の深さを計測したところ2001年7月9日では30cm、2002年8月14日では50cmほどであったため、深さ10、20、30、40cmで計測された土壌水分量の平均値とした。2001年5月3日~7月9日および2002年6月10日~8月14日の Θ は0.10~0.17で変動しており、2001年6月16日および2002年7月20~21日は根群域に土壌水が十分にあり、蒸発散量は可能蒸発散量と一致すると考えられる。

トウモロコシの植物丈の最大値が1.60mであることを考慮して、風速関数を気象観測露場で計測された高さ1.85mにおける風速 $u_{1.85}$ についてプロットしたところ図-6を得た。ただし、 $(R_n - G) < 0$ もしくは $(\Delta + \gamma) / \gamma(e_s - e) < 1.0 \text{ hPa}^{-1}$ のときの結果は除いてある。式(22)および(23)の a 、 b を最小二乗法で求めたところ式(25)、(26)が得られた。

$$f|_{h=1.60m} = 0.074u_{1.85} + 0.058 \text{ (mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (25)$$

$$f|_{h=1.60m} = 0.13u_{1.85}^{0.59} \text{ (mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (26)$$

式(24)で求めた風速関数と式(25)、(26)のそれとの相関係数はそれぞれ0.65、0.72であり、風速関数と風速の関係は式(26)で表わすほうがよいといえる。

次に、2002年6月26~28日および2001年6月2、3日の茎内流量を式(24)の E_p に代入して植物丈0.65、0.90mの風速関数を求め、植物丈が風速関数に及ぼす

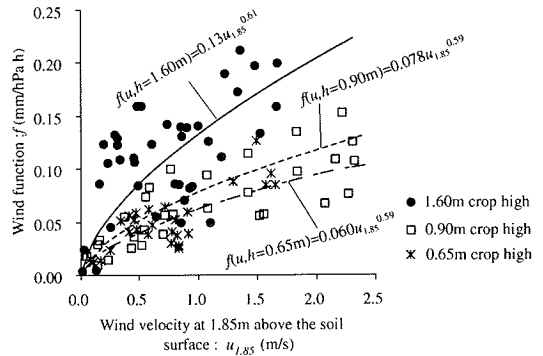


図-6 風速関数と高さ1.85mにおける風速の関係

影響を調べた。なお、蒸散係数 ϕ_p は2001年6月16~18日および2002年7月20~24日、8月2・3、5~9、11~13日の式(14)および(26)で求めた可能蒸散量と茎内流量との比較により得られた式(30)(後述)を用いて算出した。図-6には植物丈0.65、0.90mの風速関数 f と風速 $u_{1.85}$ の関係を示している。植物丈0.65、0.90mのときの式(23)の定数 a 、 b を最小二乗法で求めたところ式(27)、(28)が得られた。

$$f|_{h=0.65m} = 0.060u_{1.85}^{0.61} \text{ (mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (27)$$

$$f|_{h=0.90m} = 0.078u_{1.85}^{0.59} \text{ (mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (28)$$

式(26)~(28)を比較すると式(23)の b はほぼ0.6で一定であるが、 a は植物丈が高くなるほど大きい値をとることが分かる。また、裸地($h = 0$, $LAI = 0$)の場合には蒸散量は0であるので、 $h \rightarrow 0$ のとき $a \rightarrow 0$ となる。これらを考慮し、 a が h に比例すると仮定すると風速関数は式(29)で表わされる。

$$f = 0.083hu_{1.85}^{0.60} \text{ (mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (29)$$

b) 蒸散係数と土壌水分量の関係

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ことが知られている³⁾。図-7に2001年6月16~18日、2002年7月20~24日、8月2・3、5~9、11~13日の5期間における茎内流量と式(14)、(15)および(26)を用いて算出した蒸散係数 ϕ_p と根群域の土壌水分量 Θ との関係を示す。2001年6月16~18日、2002年7月20~24日の ϕ_p は Θ に関わらず1と見なすことができ、土壌の乾燥による蒸散量の減少は見られないことが分かる。この傾向はGardner and Ehlig¹⁵⁾の研究結果と一致し、砂質土では Θ が0.10でも根の吸水は制限されないといえる。

しかし、図-7の2002年8月5~9日の ϕ_p を見ると、2001年6月16~18日および2002年7月20~24日と同様に図-7は Θ に依存せず一定の値をとるが、その値は0.5である。2002年8月2・3日および8月11~13日の ϕ_p は、土壌水分量の変動が小さいため議論の余地は

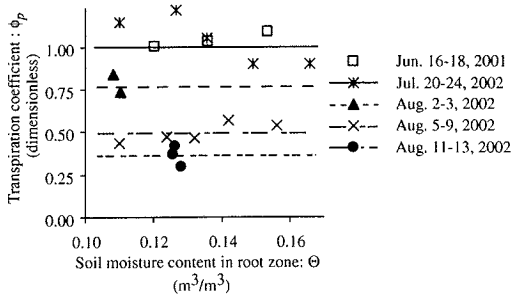


図-7 蒸散係数と根群域における土壌水分量の関係

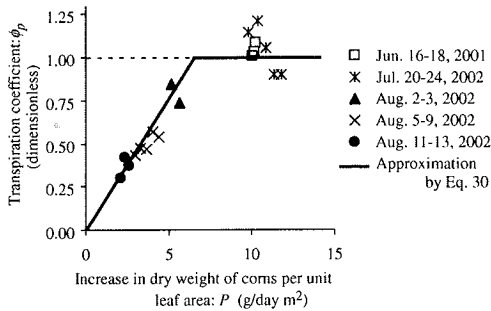


図-8 蒸散係数と植物の乾燥重量の関係

あるが、ここでは Θ に関わらず一定であると見なすと、2002年8月2～13日は時間を経るにつれて ϕ_p が減少している。この生育後期に見られる蒸散量の減少は多くの研究で認められており、葉の老化・枯死が原因と考えられている。

葉が老化・枯死すると蒸散量のみでなく光合成量も減少する³⁾。図-3を見ると2002年8月2～13日(植付け日より53～64日後)の乾燥重量の増加量は2002年7月20～24日(植付け日より40～45日後)のそれよりも小さく、2002年8月2～13日の光合成量は2002年7月20～24日より少ないと考えられる。図-8に蒸散係数 ϕ_p と植物の単位葉面積あたりにおける乾燥重量の増加量 P の関係を示す。この図は2001年6月16日および2002年7月20～21日の蒸散係数 ϕ_p を1と仮定したことによって得られたものであり、妥当性についてはさらに検討を要するが、 P が小さくなるにつれて ϕ_p が減少することが分かる。ここでは、 P と ϕ_p の関係を式(30)で近似した。

$$\phi_p = \min(0.17P, 1) \quad (30)$$

4. 蒸散散推定モデルの妥当性

式(1)、(13)～(17)、(29)および(30)を用いて2001年5月3日～7月9日の土壌槽Wおよび2002年6月10日～8月14日の土壌槽Eの蒸散散量を算出した。蒸散散量の観測値およびここで提示した手法による計算値、Penman法による計算値の比較を図-9に示す。同図に

は、日雨量と灌漑量および深さ10cmの土壌水分量の観測値が併示してある。

Penman法による蒸散散量は、2001年、2002年ともに丈が低い成長初期では観測値とほぼ一致しているが、トウモロコシが成長するにつれて観測値との差が大きくなるのが分かる。これは式(21)の風速関数が土壌水が十分ある芝生の蒸散散量を対象としているためであり、トウモロコシが成長するにつれて式(21)の適用が困難になると考えられる。それに対して、本モデルによる蒸散散量の計算値は全成長期間にわたって観測値とよく一致している。対象とする場に応じて風速関数を的確に評価することがいかに重要であるか分かる。

蒸散散量の観測値、Penman法および本モデルによる計算値は、2001年5月3日～7月9日ではそれぞれ312、218、315mm、2002年6月10日～8月14日では375、255、360mmであった。Penman法による蒸散散量は観測値に比べて29～31%ほど小さいが、本モデルによる蒸散散量の計算値は観測値とほぼ一致している。また、本モデルによる蒸散散量と地表面からの蒸散量の計算値は、2001年5月3日～7月9日ではそれぞれ250、65mm、2002年6月10日～8月14日では278、82mmであり、地表面からの蒸散量は蒸散散量の21～23%であることが明らかになる。

5. 結論

植物の成長が蒸散散に及ぼす影響を明らかにするため、ウェイングライシメータによる水収支観測および植物の茎内流量計測を行った。また、これらの観測結果に基づいて、植物の成長、土壌水分量、気象条件を考慮した蒸散散モデルを構築し、その有用性について議論した。ここで得られた結論をまとめると次のとおりである。

- トウモロコシを9本植栽した土壌槽の蒸散散量は裸地の場合の2.1～2.2倍、裸地の表面流出量は植栽した土壌槽の2.9～3.0倍である。植物による土壌槽の水収支への影響は大きい。
- トウモロコシを生育する際には、全乾燥重量の192～295倍、穀果乾燥重量の988～1873倍の水が蒸散散によって消費される。水資源を考えるうえで無視できない。
- 植物丈、葉面積、乾燥重量と蒸散散量の関係を明らかにし、それを応用して蒸散散モデルを構築した。本モデルをライシメータに適用したところ、蒸散散量の計算値は観測値とよく一致した。
- 風速関数と風速の関係は式(22)よりも式(23)で表わした方がよい。また、風速関数は植物丈に依存し、式(29)で表わされる。

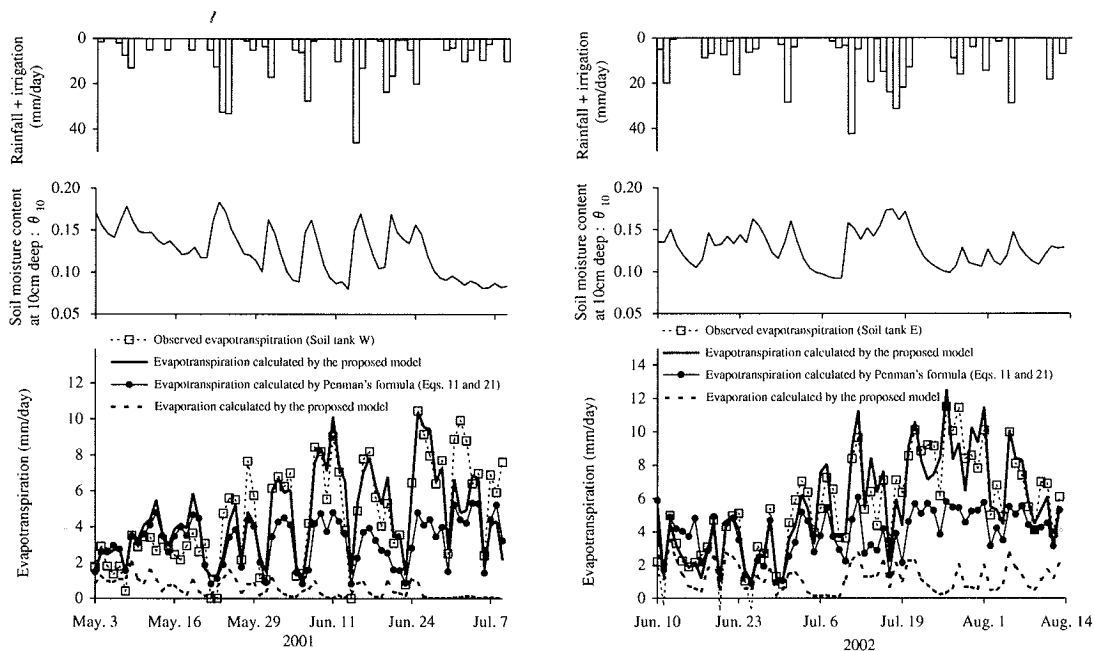


図-9 蒸発散量の計算値と観測値の比較

- (e) 土壌の乾燥による蒸散量の減少は根群域の土壌水分量が $0.10\text{m}^3/\text{m}^3$ でも生じない。
- (f) 蒸散係数と乾燥重量の関係については検討せねばならぬ点が残っているが、蒸散係数は植物体の乾燥重量の増加量が減少するにつれて小さくなることが分かった。
- (g) 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77~79, 21~23%であることが本モデルによる蒸発散量の計算結果より明らかになった。地表面からの蒸発量は蒸散量と比較して小さい。

蒸発散量は植物の成長に大きく左右されるため、蒸発散量の算定には植物の成長を考慮する必要があることが認められた。しかし、ここで提示した風速関数、吸光係数、蒸散係数、蒸発係数および植物の成長は、本ライシメータにおける観測条件下で得られたものであり、現地に適用できるとは必ずしもいえない。また、現地では土壌水分量や気象など蒸発散量の算定に必要なデータが十分でないことも予測される。本モデルの現地への適用性や単純化についてさらに検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 森脇 亮, 神田 学, 横山 仁, 高柳百合子, 浜田 崇: 「神宮の森」の蒸散活動と熱収支1996年夏季集中観測, 水工学論文集, Vol. 41, pp. 43-48, 1997.
- 2) 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.
- 3) Mohr, H. and Schopfer, P.: 植物生理学, 網野真一, 駒嶺 穆 監訳, シュプリンガーフェアラーク東京, pp. 1

- 598, 1999.
- 4) Grime, V.L., Morison, J.I.L. and Simmonds, L.P.: Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 74, pp.1-25, 1995.
- 5) 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.
- 6) Grime, V. L. and Sonclair, F.L.: Source of error in stem heat balance sap flow measurements, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 94, pp.103-121, 1999.
- 7) 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.
- 8) Monteith, J.L.: Evaporation and environment, *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. 19, pp. 5-234, 1965.
- 9) Penman, H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A193, pp. 120-145, 1948.
- 10) Feddes, R.A., Bresler, E. and Neuman, S.P.: Field test of modified numerical model for water uptake by root systems, *Water Resour. Res.*, Vol.10, No. 6, pp. 1199-1206, 1974.
- 11) Ritchie, J.T.: Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, *Water Resour. Res.*, Vol.8, No.5, pp. 1204-1213, 1972.
- 12) Gardner, W.R.: Some steady state solution of the unsaturated moisture equation with application to evaporation from a water table, *Soil Sci.*, Vol. 85, pp. 228-232, 1958.
- 13) 塚本良則: 森林水文学, 文永堂出版, pp. 1-319, 1992.
- 14) Szeicz, G. and Endrodi, G.: Aerodynamic and Surface Factors in Evaporation, *Water Resour. Res.*, Vol. 5, No. 2, pp. 381-394, 1969.
- 15) Gardner, W.R. and Ehlig, C.F.: The influence of soil water on transpiration by plants, *J. Geophys. Res.*,

EVAPOTRANSPIRATION DURING CORN GROWTH
IN A WEIGHING LYSIMETER

- EFFECTS OF PLANTS ON HYDROLOGIC PROCESSES -

Hironori HIGASHI and Taro OKA

A method of estimating evapotranspiration during plant growth is proposed based on field observations. Water balance measurements were carried out for a crop of corn using a weighing lysimeter, and sap flow was measured using the stem heat balance method. It was clarified that evapotranspiration in planted plots is 2.1 to 2.2 times that for a bare plot, and that the water consumed by the corns is 192 to 295 times the weight of the dry matter. A model of evapotranspiration was constructed using the characteristics of plant growth, the meteorological conditions and soil moisture content. The validity of the proposed model was confirmed by comparing the calculated and observed results for evapotranspiration during plant growth.