

植物の成長と茎内流量を考慮した蒸発散モデル —— ライシメータにおける水・物質収支の観測研究 (1) ——

東 博紀*・岡 太郎

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

本研究では、ウェイングライ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い、蒸発散推定モデルについて検討した。ここで提案したモデルは植物の成長、気象、土壌水分条件が考慮されている。本モデルをトウモロコシが植栽されている土壌槽に適用したところ、計算結果より得られた蒸発散量は観測値をうまく再現し、本モデルの妥当性が確認された。

キーワード：茎内流量，SHB法，植物の成長，蒸発散，ウェイングライシメータ

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、流域における水循環機構を明確にし、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、蒸発散機構の解明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、これらは同じ気象条件下においても植物の種類・生育・土壌水分状態によって大きく変化する。また、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。このメカニズムは植物生理の分野で解明されつつある(Mohr and Schopfer, 1999)ものの、多くの因子が複雑に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。

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、1999年4月よりウ

ェイングライシメータ (weighing lysimeter) を用いて自然気象条件下で観測研究を行っている (Photo 1)。ここで、Photo 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。土壌槽の構造・測定項目および充填土壌については前報(岡ら, 2001)に詳述してあるので省略する。1999および2000年の観測結果より、トウモロコシの蒸発散量は裸地の場合の3.3~2.0倍であり、植物の生育には乾燥重量の数百倍の水が必要であるなど、植物が水収支を考えるうえで無視できないことが明らかになっている。

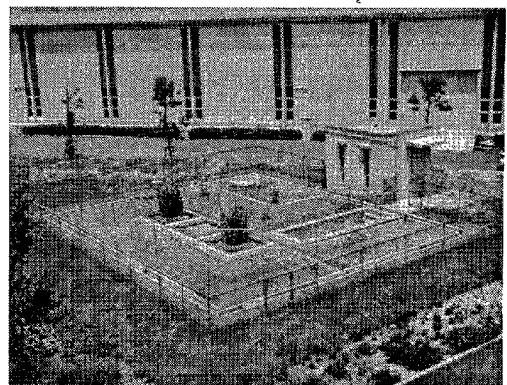


Photo 1 Weighing lysimeter

2001年4月より、植物の蒸散特性をさらに明らかにするため、stem heat balance method(SHB法)による植物の茎内流量の計測を行った。また、amplitude domain reflectometry (ADR) 土壌水分計を各土壌槽に追加し、深さ10, 20, 30, 40, 60, 100cm土壌水分量を10分間隔で計測した。本報では、これらの観測結果を用いて植物の成長、気象、土壌水分条件を考慮した蒸発散推定モデルについて検討する。

2. 水収支と茎内流量の計測

2.1 水収支観測

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に保っている。Table 1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0.33～0.34倍、蒸発散量は2.1～2.2倍であり、植物による水収支への影響がいかに大きいか分かる。またTable 1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。これらの結果は1999～2000年に得られた水収支とほぼ一致している。

Table 1 Water balance

	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	-

2.2 植物の成長

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2001年3月にライシメータ付近に圃場(Photo 2)を設け、2001年5月3日より7月9日にわたってトウモロコシを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。

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およびKimballが提案した成長曲線(Mohr and Schopfer, 1999)をFig.1に示す。ここに、背丈は地表面から穂先までの高さ、葉面積は1個体における総和であり、それぞれ物差しを用いて計測した。また、乾燥重量は根を含む植物を空気乾燥させたものである。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。

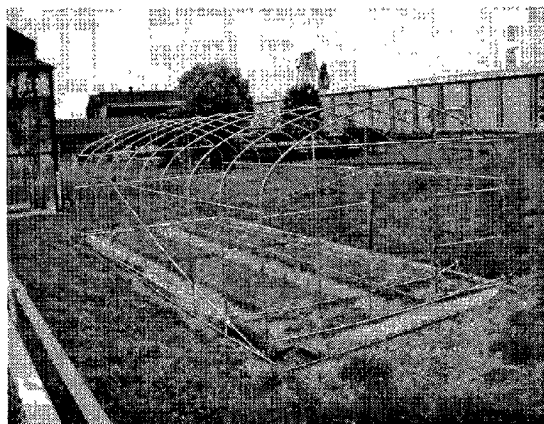


Photo 2 Crop field

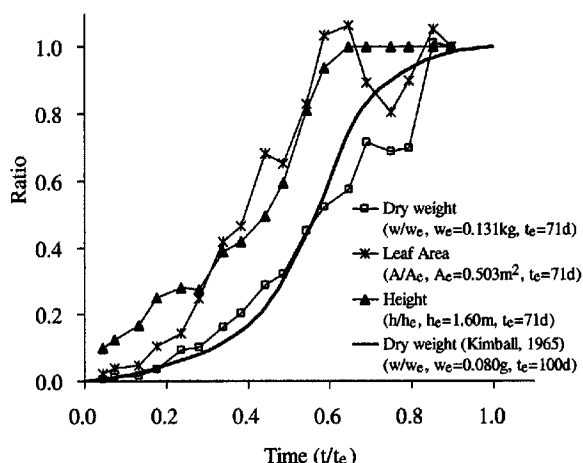


Fig.1 Growth curves for a sample corn

2.3 茎内流量の計測

(1) Stem heat balance method(SHB法)

植物の茎内流量の測定は自然条件下において簡便に比較的精度よく蒸散量を計測する手法として注目されている。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に、現在までに多くの手法が開発されている(Grime et al., 1995)。本研究で

は、茎を損傷させることなく計測が可能であるSHB法 (Sakuratani, 1981) を採用した。SHB法の概要をFig.2に示す。SHB法では、断面積 A 、長さ L の植物の茎をヒータで加熱し、6点の温度計測結果をもとに加熱した部位の熱収支を求めることで、茎内流量が算定される。

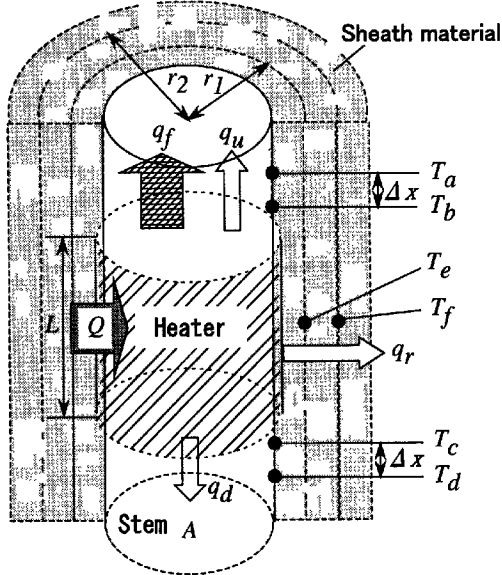


Fig.2 Schematic of the apparatus used for the stem heat balance method

定常状態においてヒータの熱量 Q は、茎内流量によって輸送される熱量 q_f 、伝導によって茎の上下に移動する熱量、それぞれ q_u 、 q_d 、および断熱材を通して空気中に移動する熱量 q_r に分配される。

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

q_f は上向きを正とすると(2)式で表される。

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

ここに、 F : 茎内流量、 c_w : 水の比熱($=4.186 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 $T_a \sim f$: Fig.2に示してある位置 $a \sim f$ の温度である。

q_u 、 q_d は茎の軸方向に x 座標をとると、それぞれ(3)、(4)式で表される。

$$q_u = -\lambda A \frac{dT}{dx} = \lambda A (T_b - T_a) / \Delta x \quad (3)$$

$$q_d = \lambda A \frac{dT}{dx} = \lambda A (T_c - T_d) / \Delta x \quad (4)$$

ここに、 λ : 茎の熱伝導率である。

q_r は、一般に(5)式で表される。

$$q_r = k (T_e - T_f) \quad (5)$$

ここに、 k : 茎の形状と断熱材の熱伝導率に関する定数で、茎が円柱状の場合には(6)式で算出される。

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

ここに、 λ_s : 断熱材の熱伝導率、 $r_{1,2}$: それぞれFig.2に示してある距離である。 $T_b \neq T_c$ の時、(1)~(5)式を茎内流量 F についてまとめると(7)式を得る。

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

(2) 計測装置と結果

茎内流量の計測はライシメータ付近の圃場において2001年6月1日~6月8日、6月12日~22日に行った。Photo 3に茎内流量計測装置の設置状況を示す。本研究では幅5cm、長さ10cmの帯状のヒータで茎を加熱し、サーミスタを用いて1分間隔で温度計測を行った。写真に見られるように、ヒータおよびサーミスタは地表面から20~30cmの位置に取り付けられており、それらは断熱材(スポンジ)で覆われている。また、断熱材の表面は日射の影響を受けないように反射材で被覆されている。



Photo 3 Sap flow measurement

(7)式を用いて得られた温度データから茎内流量を算定した。用いた定数をTable 2に示す。 λ についてはほとんどの植物茎は $0.54 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であると言われている(Sakuratani, 1984)。 λ_s は、測定の結果、 $0.055 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ であった。また、茎内流量が小さくなると $T_b \approx T_c$ となり、(7)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とが知られている。これについては、Grime et al.(1999)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。

Table 2 Parameter for calculations of sap flow rate

	$Q(\text{W})$	$A(\text{cm}^2)$	$r_1(\text{cm})$	$r_2(\text{cm})$	$k(\text{W/K})$
Jun. 1-8	0.414	4.71	1.82	2.42	0.060
Jun. 12-22	0.285	5.28	1.90	2.50	0.063

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

Table 3に2001年6月2, 3, 16~18日の茎内流量 $E_{p \text{ obs.}}$ と土壌槽 W の蒸発散量 $E_{\text{obs.}}$ 、および深さ10cmの日平均土壌水分 θ_{10} を示す。また、Fig.3に2001年6月

16～6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1m²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。Table 3を見ると、茎内流量 $E_{p\text{ obs.}}$ は土壌槽Wにおける蒸発散量 $E_{\text{obs.}}$ と比較して少なく、その差 $E_{s\text{ obs.}} (= E_{\text{obs.}} - E_{p\text{ obs.}})$ は土壌水分量 θ_{10} が少な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Fig.3より、早朝および夕方における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壌槽Wにおける蒸発散量の変動と概ね同じ傾向を示している。ここで試作した茎内流量測定装置および用いた定数は妥当であると判断できる。

Table 3 Observed evapotranspiration and sap flow (June 2-3, June 16-18, 2001)

	Jun. 2	Jun. 3	Jun. 16	Jun. 17	Jun. 18
h	0.9	0.9	1.6	1.6	1.6
LAI	3.0	3.0	4.3	4.3	4.3
θ_{10}	0.122	0.101	0.143	0.121	0.104
$E_{\text{obs.}}$	6.80	6.25	7.79	8.20	6.10
$E_{p\text{ obs.}}$	5.44	6.33	6.23	7.19	6.06
$E_{s\text{ obs.}}$	1.36	-0.08	1.56	1.01	0.04

h : Crop height (m), LAI : Leaf area index,
 θ_{10} : Soil moisture content at 10cm deep in Soil-tank W,
 $E_{\text{obs.}}$: Observed evapo-transpiration at Soil-tank W (mm/day),
 $E_{p\text{ obs.}}$: Sap flow (mm/day),
 $E_{s\text{ obs.}}$: Evaporation from soil surface (= $E_{\text{obs.}} - E_{p\text{ obs.}}$, mm/day).

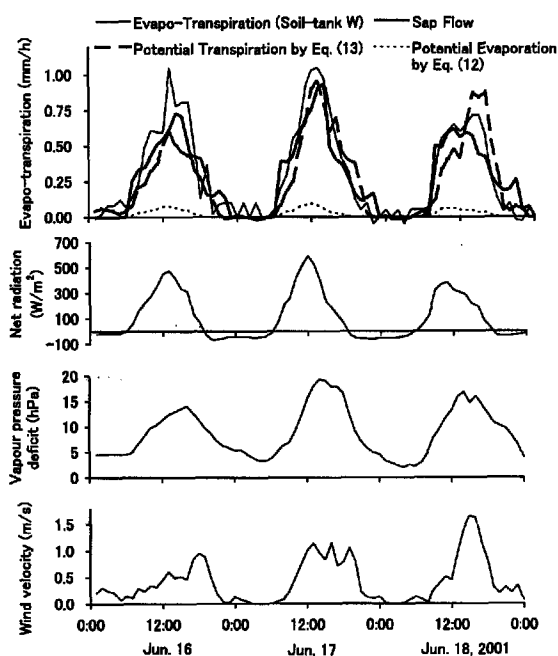


Fig.3 Comparison between sap flow, observed and potential evapotranspiration

3. 植物の成長を考慮した蒸発散推定モデル

3.1 基礎式

蒸発散量を推定する手法としてPenman-Montieth式(8)がある(Montieth, 1965)。

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

ここに、 E_{pm} :蒸発散量、 R_n :純放射量、 Δ :飽和水蒸気曲線の傾き、 γ :乾湿計定数、 l :蒸発潜熱、 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、 r_a は空気力学抵抗である。 ϕ は0～1の値をとる関数で、(9)式で表わされる。

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

r_c は気孔抵抗であり、土壌に十分な水がある場合は無視され、(8)式は(10)式となる。

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

ここに、 E^* :可能蒸発散量(気孔抵抗が無視できる蒸発散量)である。

Feddes et al.(1974)は、可能蒸発散量 E^* を可能蒸散量(気孔抵抗が無視できる蒸散量) E_p^* と可能蒸発量(十分に湿った土壌からの蒸発量) E_s^* の和としている。

$$E^* = E_p^* + E_s^* \quad (11)$$

地表面からの可能蒸発量 E_s^* は(12)式で表わされる(Ritchie, 1972)。

$$E_s^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \exp(-\alpha LAI) \quad (12)$$

ここに、 LAI :葉面積指数、 α :経験定数であり、Ritchie(1972)は0.398という値を提案している。(10)～(12)より、可能蒸散量 E_p^* は(13)式で算出される。

$$E_p^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \{1 - \exp(-\alpha LAI)\} + \frac{\rho C_p (e_s - e) / r_a}{l(\Delta + \gamma)} \quad (13)$$

土壌が乾燥すると蒸散量および地表面からの蒸発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(14)、(15)式で表わす。

$$E_p = \phi_p(\theta) E_p^* \quad (14)$$

$$E_s = \phi_s(\theta) E_s^* \quad (15)$$

ここに、 ϕ_p , ϕ_s :は0～1の値をとる土壌水分量の関数である。

3.2 空気力学抵抗 r_a および ϕ_p , ϕ_s の決定

(1) 空気力学抵抗, r_a

一様等方性乱流理論を用いて空気力学抵抗 r_a は(16)式で表わされる。

$$r_a = \frac{1}{\kappa^2 u(z) \left(\ln \frac{z-d}{z_0} \right)^2} \quad (16)$$

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(17), (18)式で表わすことにする(塚本, 1992)。

$$d = 0.70h \quad (17) \quad z_0 = 0.07h \quad (18)$$

(11)~(18)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 が大きくなるため、 r_a が小さくなり E_p^* が増加すること、 E_s^* が減少することが説明できる。

(2) ϕ_s と土壌水分量の関係

ϕ_s は、裸地(土壌槽C)における蒸発量(E_s)、(12)式で得られる E_s^* を(15)式に代入して算出することができる。なお、(12)式中の LAI は裸地であるため0である。 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Fig.4が得られた。 ϕ_s と θ_{10} の関係は図中の曲線(19)式で近似できる。

$$\phi_s(\theta_{10}) = \left[1 + \exp \left\{ -35 \left(\frac{\theta_{10} - \theta_i}{\theta_s - \theta_i} \right) + 11 \right\} \right]^{-1} \quad (19)$$

ここに、 θ_s , θ_i :それぞれ0.36, 0.01である。

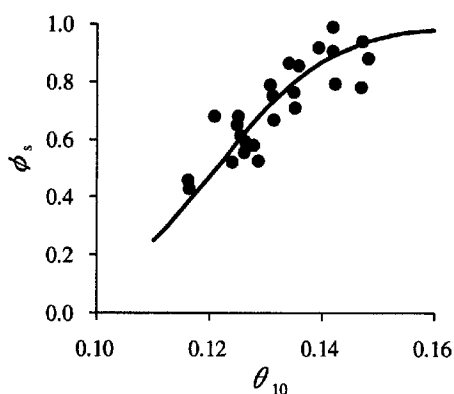


Fig.4 Relationship between ϕ_s and θ_{10}

(3) ϕ_p と土壌水分量の関係

ϕ_p は、蒸散量とみなせる茎内流量(E_p)と(13)式より得られる E_p^* を(14)式に代入して算出することができる。Fig.3には計算結果より得られる可能蒸散量が併示してあ

る。なお、可能蒸散量の計算には、Fig.1に示してある植物丈 h および葉面積指数 LAI を用いた。Fig.3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が、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壌槽Wの蒸発散量と大きく異なっている。6月16~18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(13)式右辺第2項が過大に評価されていると考えられる。

Table 4には6月2, 3, 16~18日の可能蒸発散量および ϕ_p を示してある。可能蒸散量 E_p^* とTable 3に記してある茎内流量 E_p obs.を比較すると、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の範囲にある時は、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く、 ϕ_p はほぼ1と見なすことができる。

Table 4 Potential evapotranspiration by Eqs. (10)-(18) (June 2-3, June 16-18, 2001)

	Jun. 2	Jun. 3	Jun. 16	Jun. 17	Jun. 18
E^*	6.35	6.41	6.03	8.26	7.36
E_p^*	5.32	5.35	5.27	7.04	6.28
E_s^*	1.03	1.06	0.56	0.58	0.45
ϕ_p	1.02	1.18	1.18	1.02	0.97

E^* , E_p^* and E_s^* : Potential evapo-transpiration, transpiration and evaporation, respectively, ϕ_p : model coefficient ($=E_p \text{ obs.}/E_p^*$).

3.3 蒸発散量の推定結果

(10)~(19)式を用いて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Wの蒸発散量を推定した。Fig.5に解析結果と観測結果の比較を示してある。蒸発散量の計算値は観測値と大きく異なる日も見られるが概ね一致している。この期間における蒸発散量の観測値、計算値はそれぞれ312, 331mm, 平均絶対誤差は1.4mm/dayであった。解析結果の蒸発散量の内訳は蒸散283mm, 地表面からの蒸発が48mmで、それぞれ蒸発散量の86%, 14%であり、地表面からの蒸発量は蒸散量に比較して小さいことが分かる。

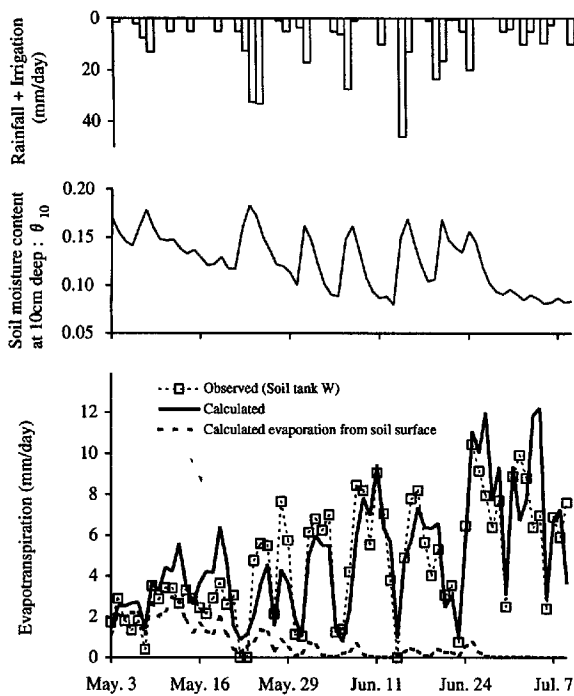


Fig.5 Comparison between observed evapotranspiration and calculated one by Eqs. (10)-(19)

4. 空気力学抵抗 r_a と経験定数 α の吟味

前章で用いた空気力学抵抗 r_a および経験定数 α は、広い平坦なフィールドを対象として得られたものであり、自ら適用限界がある。ここでは、ウェイングライシメータに孤立した状態で植栽されたトウモロコシの蒸発散量を計算する場合の r_a 、 α について吟味する。

4.1 経験定数 α の決定

α を6月16～18日の蒸発量 $E_{s, obs.}$ と(12), (15), (19)式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。これを6月2, 3日に適用し、得られた蒸発量 E_s をTable 5に示してある。6月2, 3日の E_s はTable 3に示してある $E_{s, obs.}$ とほぼ合致し、 α は妥当であると判断できる。

Table 5 Calculated evapotranspiration by Eqs. (12), (14), (15), (19), (26), (27), (30), (32) (June 2-3, June 16-18, 2001)

	Jun. 2	Jun. 3	Jun. 16	Jun. 17	Jun. 18
E	7.07	5.65	7.47	8.15	6.34
E_p	5.95	5.45	5.84	7.13	6.04
E_s	1.28	0.37	1.38	0.96	0.26
E_p^*	5.96	5.73	5.84	7.16	6.28
E_s^*	1.94	2.10	1.48	1.55	1.25

E, E_p and E_s : Calculated evapotranspiration, transpiration and evaporation, E_p^* and E_s^* : Potential transpiration and evaporation, respectively.

4.2 空気力学抵抗と風速関数

Penman-Montieth式(8)を経験的に求められる風速関数 f を用いて表わすと(20)式となる。

$$E_{pm} = \phi \left\{ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(e_s - e) \right\} \quad (20)$$

風速関数 f と空気力学抵抗 r_a の関係は(21)式で表わされる。

$$\frac{1}{r_a} = \frac{\gamma l}{\rho C_p} f \quad (21)$$

風速関数は一般に(22), (23)式が用いられる。

$$f = a + bu \quad (22)$$

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

ここに、 a , b : 経験定数である。Penman(1948)は土壌水が十分にある芝生の蒸発散量を用いて(22)式の定数 a , b を求め、(24)式を提案している。

$$f(u_2) = 0.26(1 + 0.54u_2) \quad (\text{mm day}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (24)$$

ここに、 u_2 : 地表面から高さ2mの風速(m/sec)である。(24)式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推定するが、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。

風速・気温・湿度の鉛直分布が一様である場合、(16), (21)式より(25)式が成立する。

$$f = \frac{\rho C_p k^2}{\gamma l} u(z) \frac{1}{[\ln \{(z-d)/z_0\}]^2} \quad (25)$$

(25)式中の d と z_0 は前述のように植物の成長とともに変化するため、風速関数 f は風速と植生状態によって変化すると考えられる。ここで、風速関数 f は風速 u と植物丈 h の関数であると仮定する。前章と同様に、(20)式より可能蒸発散量 E^* 、可能蒸散量 E_p^* を導くと、それぞれ(26)式、(27)式が得られる。

$$E^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u, h)(e_s - e) \quad (26)$$

$$E_p^* = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \{1 - \exp(-\alpha LAI)\} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u, h)(e_s - e) \quad (27)$$

4.3 植物丈1.60mにおける風速関数と風速の関係

(14), (27)式より $f(u, h)$ は(28)式で表わされる。

$$f(u, h) = \frac{\Delta + \gamma}{\gamma(e_s - e)} \left[\frac{E_p^*}{\phi_p} - \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{l} \{1 - \exp(-\alpha LAI)\} \right] \quad (28)$$

ここで、6月2, 3, 16～18日で θ_{10} が最も大きい6月16日の ϕ_p を1($E_p^* = E_p$)とする。茎内流量を E_p に代入して $f(u, h = 1.60\text{m})$ を算出し、地表面からの高さ1.85mにおける時間平均風速 $u_{1.85}$ についてプロットしたところFig.6が得られた。ただし、 $(R_n - G) < 0$ もしくは

$(\Delta + \gamma) / \gamma (e_s - e) > 1.0 \text{ hPa}^{-1}$ の時の結果は除いてある。また、6月16日は最大時間平均風速0.95mであり、風速の変動が小さい日であったため、 θ_{10} がほぼ等しい6月25日の蒸散量から同様に算出した $f(u, h = 1.60\text{m})$ と $u_{1.85}$ の関係も Fig.6に併示してある。なお、6月25日の蒸散量は土壌槽Wの蒸発散量と(12), (15), (19)式を用いて算出される地表面からの蒸発量の差で求めた。 $f(u, h = 1.60\text{m})$ と $u_{1.85}$ の関係は(22)式よりも(23)式で近似した方がよく一致する。(23)式の定数 a , b を最小二乗法で求めたところ(29)式が得られた。

$$f(u, h = 1.60\text{m}) = \frac{\rho C_p}{\gamma l r_a} \Big|_{h=1.60\text{m}} = 0.14 u_{1.85}^{0.61} \Big|_{h=1.60\text{m}} \quad (\text{mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (29)$$

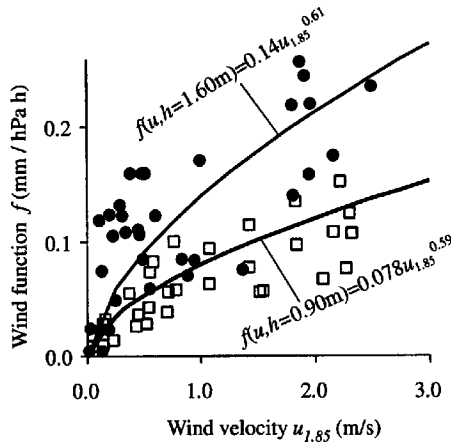


Fig.6 Relationship between $f(u, h)$ and $u_{1.85}$

4.4 ϕ_p と土壌水分量の関係

前章では可能蒸散量 E_p^* と茎内流量 $E_{p \text{ obs.}}$ の比較により $\phi_p = 1$ を得ている。可能蒸散量 E_p^* は空気力学抵抗 r_a によって異なるため ϕ_p を再検討する必要がある。

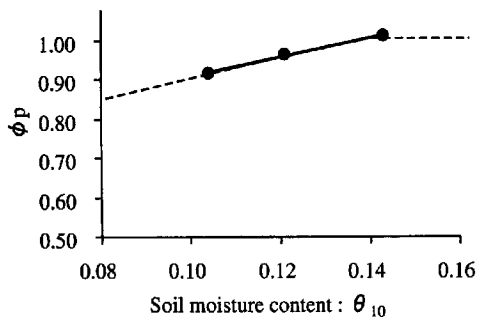


Fig.7 Relationship between ϕ_p and θ_{10}

6月16日～18日の茎内流量(E_p), (14), (27), (29)式を用いて ϕ_p が算出できる。Fig.7には ϕ_p と θ_{10} の関係が

示してある。 θ_{10} が少なくなるにつれて ϕ_p は減少しているが、前章の結果と同様、蒸散抑制効果はあまり大きくないことが分かる。なお、図中の近似直線は(30)式である。

$$\phi_p(\theta_{10}) = \min[1, \max\{0, (2.61\theta_{10} + 0.692)\}] \quad (30)$$

4.5 植物の成長と風速関数の関係

植物丈0.90mの6月2, 3日の茎内流量(E_p), (14), (27), (30)式を用いて $f(u, h = 0.90\text{m})$ が算出することができる。Fig.6には $f(u, h = 0.90\text{m})$ と $u_{1.85}$ の関係を併示してある。 $f(u, h = 0.90\text{m})$ と $u_{1.85}$ の関係は $f(u, h = 1.60\text{m})$ の場合と同様に(22)式よりも(23)式で近似した方がよく一致する。定数 a , b を最小二乗法で求めたところ(31)式が得られた。

$$f(u, h = 0.90\text{m}) = \frac{\rho C_p}{\gamma l r_a} \Big|_{h=0.90\text{m}} = 0.078 u_{1.85}^{0.59} \Big|_{h=0.90\text{m}} \quad (\text{mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (31)$$

(29)式と(31)式を比較すると(23)式 b の値はほぼ同じであるが、 a の値は変化が顕著であり植物の成長に依存しているものと考えられる。また、蒸散量は裸地($h = 0$, $LAI = 0$)の場合には0となる極限条件を満たす必要がある。これは $h \rightarrow 0$ のとき $a \rightarrow 0$ となることを意味する。これらを考慮し、 a が h に比例すると仮定すると $f(u, h)$ は(32)式で表わされる。

$$f(u, h) = \frac{\rho C_p}{\gamma l r_a} = 0.087 h u_{1.85}^{0.60} \quad (\text{mm h}^{-1} \text{ hPa}^{-1}) \quad (32)$$

4.6 蒸発散量の推定結果

(12), (14), (15), (19), (26), (27), (30), (32)式を用いて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Wの蒸発散量を推定し、ここで求めた $r_a(f)$ および α の妥当性を検証する。Fig.8にはここで提案した手法による計算値、Penman法による計算値、観測値の比較が示してある。Penman法による蒸発散量は背丈が低い成長初期段階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ともなって過小評価されている。それに対して、本モデルによる計算値はトウモロコシの全成長段階において観測値と一致していることがわかる。この期間における蒸発散量の観測値、計算値はそれぞれ312, 340mmであり、平均絶対誤差は1.0mm/dayであった。前章の計算結果と比較すると、平均絶対誤差でかなりの精度向上が見られる。なお、解析結果の蒸発散量の内訳は蒸散275mm、地表面からの蒸発が65mmで、それぞれ蒸発散量の81%, 19%であった。

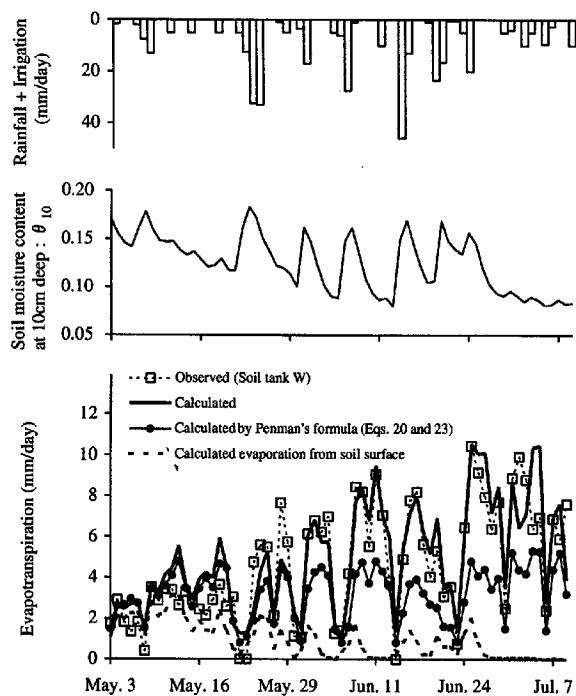


Fig.8 Comparison between observed evapotranspiration and calculated one by Eqs. (12), (14), (15), (19), (26), (27), (30), (32)

5. まとめ

本報では、はじめにウェイングライシメータにおける水収支観測およびSHB法による茎内流量計測について記した。次に、植物の成長、気象、土壤水分条件を考慮した蒸発散推定モデルについて議論した。得られた結論をまとめると次のとおりである。

- (a) 成長に伴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法は有用であり、蒸散特性を明らかにするために有力な手法であることが分かった。
- (b) 深さ10cmにおける日平均土壤水分量が0.10~0.14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。
- (c) 観測結果を用いて植物の成長とともに変化する風速関数を決定した。風速関数は(23)式で表わされ、定数 a は $0.087h$ (h : 植物丈), b は0.60である。
- (d) 植物の成長を考慮した蒸発散推定を行った。計算結果は観測結果をうまく再現した。
- (e) 空気力学抵抗 r_a と経験定数 α に既存値を用いた場合および観測結果に基づいて決定した場合の蒸発散量推定結果の平均絶対誤差はそれぞれ1.4, 1.0mm/dayであった。空気力学抵抗 r_a および経験定数 α はフィールドに応じて決定する必要がある。

- (f) 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81%, 19%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。

参考文献

- 岡 太郎・石井 将幸・東 博紀 (2001): ウェイングライシメータによる植物の成長と水収支に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第44号, B-2, pp. 445-454.
- 塚本 良則 編 (1992): 森林水文学, 文永堂出版株式会社, pp. 1-319.
- Feddes, R.A., Bresler, E. and Neuman, S.P. (1974): Field Test of Modified Numerical Model for Water Uptake by Root Systems, *Water Resour. Res.*, Vol. 10, No. 6, pp. 1199-1206.
- Grime, V.L., Morison, J.I.L. and Simmonds, L.P. (1995): Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method, *Agric. For. Meteorol.*, Vol.74, pp.1-25.
- Grime, V. L. and Sonclair, F.L. (1999): Source of error in stem heat balance sap flow measurements, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 94, pp.103-121.
- Mohr, H. and Schopfer, P. 原著, 網野 真一・駒嶺 穆 監訳 (1999): 植物生理学, シュプリンガーフェアラーク東京株式会社, pp. 1 - 598.
- Monteith, J.L. (1965): Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, Vol. 19, pp.205-234.
- Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193, pp.120-145.
- Ritchie, J.T. (1972): Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover, *Water Resour. Res.*, Vol. 8, No. 5, pp.1204-1213.
- Sakuratani, T. (1981): A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants, *J. Agric. Meteorol.(Japan)*, Vol.40, pp.273-277.
- Sakuratani, T. (1984): 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.

Modeling of Evapotranspiration during Plant Growth Using Sap Flow

- Water and Solute Balance in Weighing Lysimeter -

Hironori HIGASHI* · Taro OKA

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper describes a model of evapotranspiration using field observations, including water balance in weighing lysimeter and sap flow measured by stem heat balance method. The model of evapotranspiration was constructed using the characteristics of plant growth, the meteorological conditions, and soil moisture content. The model coefficients concerned in plant conditions were discussed and determined using the measured data, and the model was used to estimate evapotranspiration during corn growth. The validity of the proposed model for the present conditions was confirmed by comparing the calculated and observed results for evapotranspiration during plant growth.

Keywords : sap flow, stem heat balance method, plant growth, evapotranspiration, weighing lysimeter