

耕地における水収支

古藤田 一 雄

筑波大学

Water balance of arable land.

Kazuo Kotoda

Tsukuba University

1. 耕地の水収支における蒸発散の役割

植生に覆われた地表面は、日中の蒸発散、すなわち植物体を通して水が気化する蒸散と、土壌面からの水の気化による蒸発の二つの過程の同時進行によって水蒸気が大気中へと輸送され水を失うが、この他に植物体に付着した降水の蒸発などがある。わが国のような温暖湿潤気候帯に属する地域においては、蒸発散強度は、降雨強度に比べて小さいため、水収支のなかで軽視されがちであるが、降水は、局時的・局地的現象であるのに対して蒸発散は、年中継続して生起する広域的現象であるため、結果としては、降水量や流出量に匹敵するオーダーの量の水となっている。したがって、蒸発散量はマクロな観点からみれば、流域の水収支特性を支配する一つの重要な因子となり、植物分布などに大きな影響を与えている。一方、植物個体の観点からみれば、蒸散はその物質生産を支配する重要な因子として働くため、耕地の水管理に関連して蒸発散機構の解明はきわめて大きな意義を有する。

蒸発散による水の輸送は、水から水蒸気というように相変化の過程を含むので、水収支はまた熱収支と密接な関係を有する。しかも、水1gの蒸発の潜熱はおよそ600cal/gであることから、この相変化に際して莫大な熱エネルギーの交換がなされるので、水の分布と蒸発散の動行は、その地域あるいは耕地の熱収支環境の形成に大きな影響を与える。

2. 蒸発散の測定法

蒸発散の測定法は、直接法と間接法に二分することができ、前者には①ライシメーター法、②チャンパー法などがあり、後者には、①水収支法、②渦相関法（乱流変動法）、③熱収支法、④空気力学法、⑤組み合わせ法、⑥経験法などがある。（表一参照）

3. 蒸発散測定法の検討

ここでは、主に間接法について検討をする。

表一 蒸発散量の測定法

直接法	ライシメーター法 チャンパー法	秤量ライシメーター法
		フローティング・ライシメーター法
水収支法	漏水型ライシメーター法	
	流域水収支法	
渦相関法		
熱収支法	直接熱収支法	
	熱収支・ポウエン比法	
間接法	空気力学法	
	傾度法 バルク法	
組み合わせ法	Penman法	
	Monteith法	
	その他	
経験法	Thorntwaite法	
	その他	

(1) 水収支法

この方法は、次の水収支式を基礎としている。

$$P = E + G_R + S_R + \Delta M / \Delta t \quad (1)$$

ここでPは降水量、Eは蒸発散量、 G_R は正味の地下水流出量、 S_R は正味の地表水流出量、Mは土中水の貯留量、tは時間である。

水収支法によって、Eを決定するためには、P、 G_R 、 S_R 、 $\Delta M / \Delta t$ が既知でなければならぬが、Eの精度は、これらP、 G_R 、 S_R 、 $\Delta M / \Delta t$ の測定精度によって決まるので、これらの測定精度をいかにあげるかが課題となる。

(2) 渦相関法

この方法は、水蒸気フラックスを直接測定する唯一の方法で、Swinbank (1951)¹⁾などによって試みられたもので、次式で示される関係を利用している。

$$E = \rho q' w' = r (q, w) \cdot \sigma(w) \cdot \sigma(q) \quad (2)$$

ここで、q、q'は、それぞれ比湿の瞬間値および平均値からの偏差を示し、w、w'は鉛直風速の瞬間値および平均値からの偏差で、 ρ は空気の密度である。またr(q,

w) はqとwとの間の相関係数で、 $\sigma(w)$, $\sigma(q)$ はそれぞれw時系列およびq時系列標準偏差を示す。この方法は気層の安定度の如何を問わず適用することができるが、q'の測定が非常にむづかしく、長期間にわたる測定には向いていない。しかしながら、渦相関法による顕熱輸送量の決定は、w', T', (Tは温度)が、超音波温度風速計によって容易に測定できるので、次式

$$H = C_p \rho \overline{w'T'} \quad (3)$$

によって、Hを測定し、これと熱収支式からEを残差として求める、渦相関熱収支法が試みられている。

(3) 熱収支法

この方法は、次式で示される熱収支の関係を基礎としている。

$$R_n = \ell E + H + G + M_p \quad (4)$$

ここで、 R_n は正味放射量、 ℓE は潜熱輸送量 (ℓ は蒸発の潜熱)、Hは顕熱輸送量、Gは地中熱流量、 M_p は植被層の貯熱量変化である。(4)式によってEを求めるためには R_n , H, G, M_p を測定する必要があるが、ポウエン比 $\beta = \gamma(dT/dz)/(de/dz)$, $\gamma = C_p P / 0.622 \ell$ を導入することによって、次のような関係によりEを求めることができる。

$$E = (R_n - G - M_p) / [(1 + \beta)\ell] \quad (5)$$

ここで、 γ は、乾温計定数で、eは水蒸気圧、Pは大気圧である。

(4)式による方法は、熱収支ポウエン比法と呼ばれている。この方法は、風速を測定する必要がなく、Eの決定のための最も標準的な方法として利用されている。

(5) 空気力学法

Fickの法則に従えば、地表面からの水蒸気の輸送は、次のように表わすことができる。

$$E = -(C_p \rho K_v / \gamma \ell) (de/dz) \quad (6)$$

ここで K_v は水蒸気の拡散係数である。 K_v は、一般に $K_v = \kappa U_* z / \Phi_v$ (κ :カルマン常数、 U_* :摩擦速度、 Φ_v :安定度のパラメーター)の関係をを利用して求めるが、このためには、風速鉛直分布の測定が必要である。 Φ_v は、気層が中立の場合は、1の値をとるが非中立の場合は1にならない。(6)式よりEを求める方法は、湿度および風速の傾度を測定する必要があるので、傾度法と呼ばれている。

(5) 組合せ法

この方法は、Penman (1948)²⁾ によってはじめて提案され、広く知られているが、Monteith (1965)³⁾は、Penman式を修正し、次のような蒸発散式を提案した。

$$\ell E = \frac{\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} + \frac{C_p \rho (e_a^* - e_a)/\gamma r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (7)$$

ここで、 e_a^* , e_a はそれぞれ高さzにおける気温Tに対する飽和水蒸気圧および大気の水蒸気圧、 r_a は顕熱輸

送に対する空気力学的抵抗 (aerodynamic resistance), r_c は、群落抵抗 (canopy resistance)で、植物の気孔の開閉など、生理的条件が関与する。また、 Δ は温度(T)・飽和水蒸気圧(e^*)曲線の気温Tにおける勾配である。

(7)式はPenman-Monteith式とも呼ばれ、葉が完全にぬれていて、植物の水分ストレスがないと考えた場合には $r_c = 0$ とおける。このとき(7)式は、Penman式と同じ形になる。

r_a および r_c の値は、植被の性質や気候条件によって異なるが、およそ次の様な値をとる。

表-2 r_a と r_c の関係
Oke(1978)⁴⁾による

蒸 発 面	$r_a \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1} *$	$r_c \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1} **$	$r_a + r_c \text{ s} \cdot \text{cm}^{-1}$
開水面	2.0	0.0	2.00
短かい草	0.7	0.7	1.40
作物畑	0.3	0.4	0.70
森 林	0.05	1.25	1.30

* 高さ2 m, $\bar{U} = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ として計算したもの。

** 平均的な気孔の開きに対する値。

Brutsaert and Strickler (1979)⁵⁾は、別の形で、Penman式を修正した。

$$E = (2\alpha - 1) \frac{\Delta(R_n - G)}{(\Delta + \gamma)\ell} - \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (8)$$

ここで、 α は、Priestley and Taylor (1972)⁶⁾の定数(=1.26)、 E_a は、Penman (1963)⁷⁾の大気のdrying powerで、次式で与えられる。

$$E_a = 0.263(0.5 + 0.54U_z)(e_a^* - e_a) \quad (9)$$

ここに、 e_a^* , e_a の単位はmb, E_a の単位は、 $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ で、 U_z は高さ2 mにおける平均風速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)である。

図-1は、筑波大学水理実験センターの圃場(牧草地)で観測した気象データを基にして計算した蒸発散量と同じ場所に同じ牧草を植えたライシメーターで測定した実蒸発散量を比較したものである⁸⁾が、Penman式が比較的良い一致をみせたのに対して、Monteith式はあまり良く適合しなかった。この理由としては、蒸発散速度に対する風速の効果が、Penman式は線形であるのに対して、Monteith式は、風速の増大とともに、空力抵抗 r_a が急減しその結果、蒸発散速度が過大評価されたものと考えられる。Brutsaert式は、Penman式とMonteith式のほぼ中間の値をとっている。

4. 土壌水分の変化と蒸発散量

蒸発面が常に飽和している場合には、蒸発は最大の能

力を発揮するが、蒸発面が乾燥し水の補給がとぎれた場合には、蒸発のための熱エネルギーが十分あっても、蒸発は制限されるであろうことは十分考えられる。

Davies and Allen (1973)⁹⁾ は、非常に透水性の良い Fox sandy loam の土壌に育生された Perennial rygrass, トウモロコシおよび大豆畑における蒸発散量の観測結果から、水分の欠乏による蒸発抑制効果を考慮した次のような経験式を得た

$$E = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \left[1 - \exp\left(-10.563 \frac{SM}{SM_r}\right) \right] \quad (10)$$

ここに SM は体積土壌水分率 (0~5 cm の表層) で、SM_r は圃場容水量 (=0.225) である。

また、Williams, Broersma and Ryswyk (1978)¹⁰⁾ は草丈 30~60cm のハマムギ (ハネガヤ属) の植生地において蒸発散量の観測を行ない。次のような式を得た。

$$E = 0.85 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \left[1 - \exp\left(-5.268 \frac{SM}{SM_r}\right) \right] \quad (11)$$

上式は、指数関数形で与えられているが、対数関数型でも示され得るとして、次式を求めた。

$$E = 0.95 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \left[1 - 0.6 \log_{10} \frac{SM}{SM_r} \right] \quad (12)$$

ここで、SM は、0~2.5cm 層の土壌の体積水分率で、SM_r は、水分張力が -33Kpa (-333mb) に相当する水分量と仮定した。

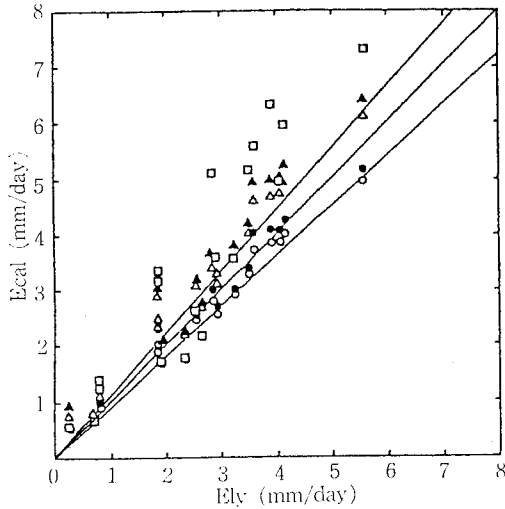


図-1 ライシメーター蒸発散量 (Ely) と各式の蒸発散量の比較 (中川, 1982)

- ● Penman式 { ○ 風速係数 0.5, ● " 1.0 }
- ● Monteith式 { ○ " 0.5, ● " 1.0 }
- △ ▲ Brutsaert式 { △ " 0.5, ▲ " 1.0 }

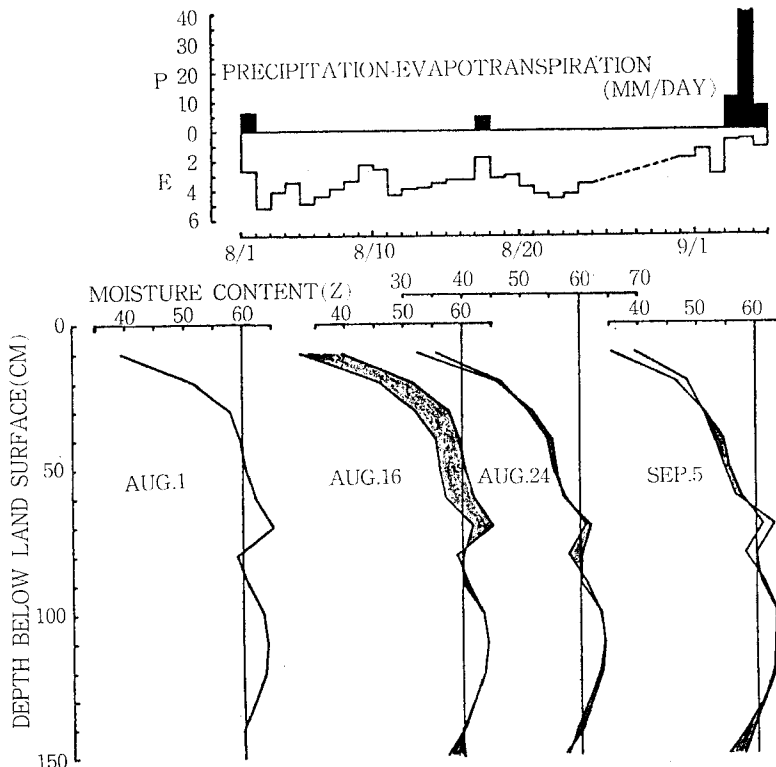


図-2 1978年8月1日~9月5日間の降水量, 蒸発散量および土壌水分プロファイルの変化

これらの結果から、土壌水分の欠乏は明らかに、あるべき蒸発散量を抑制することが認められる。

わが国においても、砂丘地のように非常に透水性のよい地域や、地下水位が非常に深い乏水地域などにおいては、夏季の旱天が続いたような場合には、土壌水分の減少が蒸発散量を制限すると考えられるが、常時は地下水位が非常に浅い位置にあり、関東ロームのように細かい土粒子からなる水分率の大きい土壌層からの蒸発散は、根系の発達具合にもよるが、夏季の1ヶ月位の連続旱天程度ではそれ程大きな蒸発散量の抑制は生じないと推察される。図-2は、1978年8月の旱天が続いたときの筑波大学水理実験センターにおいて観測¹¹⁾した降水量、ライシメーター蒸発散量および圃場の土壌水分プロファイルの変化を示したものである。この年の8月は、8月1日に6mm、8月17日に5mm、9月1日から5日までの間に58mmの降雨を記録したのみで、2日から16日の15日間および18日から31日の14日は連日晴天の続く日でありであった。このときライシメーターからの蒸発散量は、2~16日の平均値が3.5mm/day、18~24日の平均値(25日以降はスケールオーバーのため計算から除外する)は3.8mm/dayで、17日に5mmの降雨があったが、蒸発散量は土壌水分の減少によって大きく制限された様子はみられなかった。一方、圃場での中性子水分計による水分プロファイルの変化は、図の黒く塗った部分が、前回測定した水分量よりも減少した領域で、白ヌキになっているところは、増加した領域であることを示している。この図から土柱の水分量の減少を積算することによって、積算蒸発散量を推定することができるが、8月1~16日の期間は土壌水分が著しく減少しているのに対して、8月16~24日の期間はそれ程大きな減少がみられない。すなわち、蒸発量に見合った土壌水分の減少が認められなかった。これは、そう入型中性子水分計の弱点である表面近くの水分量の測定の不確かさ、キャリープレションの問題などがあるが、水分張力の傾度に従って、水分が下方から上方へと浸潤移動したためとも考えられる。しかし、詳細については不明な点が多く、今後検討すべき問題として残される。

あ と が き

水収支における蒸発散の研究上における意義は、それ

が単に水輸送の量的な問題というだけでなく、蒸発散が生ずる作物あるいは植物群落層と、その上部の大気およびその下部の土壌層の水・熱・物質・運動量の輸送と密接に関連しているため、蒸発散過程とその機構の解明は土地の水分・熱環境の管理のための基礎的な知識を与える。耕地における水の輸送と作物からの蒸発散による水の輸送はお互いに独自の存在ではなく、その解明のためには、なを多くの努力を必要とするが、農業気象的なサイドと土壌物理的なサイドから、それぞれの問題を協力して追究することは、今後の耕地の水収支研究の最も重要な課題の一つであると確信する。

引用文献

- 1) Swinbank, W. C. (1951): The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteor.*, **8**, 135~145.
- 2) Penman, H. L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc., London, A-193*, 120~145.
- 3) Monteith, J. L. (1964): In "The State and Movement of Water in Living Organisms", Symp. Soc. Exp. Biol. Vol. 19, 205~234. Cambridge Univ. Press.
- 4) Oke, T. R. (1978): *Boundary Layer Climates*. pp.280. Methuen & Co. LTD, London.
- 5) Brutsaert, W. and Strickler, H. (1979): An advetcion-aridity approach to estimate actual and regional evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, **15**, 443~450.
- 6) Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972): On the assessment of surface heat flux and evaporation. *Mon. Weather Rev.*, **106**, 81~92.
- 7) Penman, H. L. (1963): *Vegetation and Hydrology*. Tech. Communication 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden.
- 8) 中川慎治 (1982): 蒸発散の概念とその適用性について、筑波大学水理実験センター報告, **6**, 53~62.
- 9) Davies, J. A. and Allen, C. D. (1973): Equilibrium, Potential and actual evaporation from cropped surface in southern Ontario. *J. Appl. Meteor.*, **12**, 649~657.
- 10) Williams, R. J., Broersma, K. and Van Ryswyk, A. L. (1978): Equilibrium and actual evapotranspiration from a very dry vegetated surface. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 1827~1832.
- 11) 佐倉保夫・古藤田一雄 (1979): 水分・密度自動計測システムについて、筑波大学水理実験センター報告, **3**, 89~93.