土 壌 面 蒸 発 を 土 壌 水 分 傾 度 より 推 定 す る 方 法 (続 報)*

丸 山 栄 三 ・ 高 砂 学

(気 象 庁 産 業 気 象 課)

Determination of Evaporation from a Soil Surface
by Measuring the Gradient of Soil Moisture

E. MARUYAMA and M. TAKASUNA

(Industrial Meteorology Section, Japan Meteorological Agency)

1. 土 壌 か ら の 蒸 発 を 表 わ す 式

土壌中における水分移動の形は主として、液相と蒸気相の二種類に分けることができる。もつともこれ以外に空気中の水分を吸収する、吸湿による表層の水分変化も起るが、これは蒸発過程の問題としては無視できるようなものである。液相による移動も重力水を考慮に入れる必要のある過飽和土壌の場合を除けば、面から面へ毛管力による移動を考えることによつて充分表現できる。この蒸発を表わす式については、序報¹⁾でそれが熱流に近似できることと、その測定結果について報告した。つまりそれは土壌の乾燥過程における水分移動を熱伝導の式で表現し、水分拡散係数を三層の土中水分量の変化から近似的に求めて、それに水分量の傾度を乗ずることによつて土壌面の蒸発を導びいたのである。

$$\text{すなわち} \quad D = \frac{\partial \theta / \partial t}{\partial^2 \theta / \partial x^2} \approx \frac{\Delta \theta / \Delta t}{\Delta^2 \theta / \Delta x^2} \quad \dots \dots (1)$$

D は水分拡散係数, θ は単位容積中の土壌水分量,
 t は時間, x は深さ, 蒸発量 E は

$$E = D \times \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad \dots \dots (2)$$

(1), (2) 両式から蒸発量を求めた。

2. 土 壌 面 蒸 発 の 推 定 と 二, 三 の 比 較 観 測

昭和 32 年 11 月 24 日より 28 日まで、この方法によつて茨城県館野高層気象台の構内において、土壌面蒸発量の観測をおこなつた。また測定値と比較するために直径 25cm, 深さ 20cm の鉄製円筒を自然状態を乱さぬように土壌中に埋め (第 1 図), それを毎時の 30 分に大型天秤 (秤量 20kg, 感量 0.5g) を使つてその減量を測定し、単位面積当りの蒸発量を mm. で算出した。これをここでは土壌直接秤量による方法と呼ぶ。

このほか、同時におこなわれた接地気象の観測資料から計算した土壌面蒸発の値を借用しての比較をも試みた。この比較に使つた式は (3) 式および (4) 式である。

Thornthwaite-Holtzman の式

$$E = \frac{\rho K_0^2 (u_2 - u_1) (q_1 - q_2)}{\left\{ \ln \frac{z_2}{z_1} \right\}^2} \quad \dots \dots (3)$$

ここで u_1, u_2 および q_1, q_2 , は高さ z_1, z_2 における風速および混合比, ρ は空気の密度, K_0 はカルマン常数, 単位は全て C.G.S

Fig. 1. Steel Cylinder Vessel

$$E = -K_v \frac{\partial q}{\partial z} \quad \dots \dots (4)$$

(4) 式は地面近くの水分の密度傾度に、水蒸気分子の拡散係数 (実際は地面温度と全ガス圧の函数であるがここでは 0.24 を採用) を乗じて蒸発量を算出した。

これらの観測をおこなつた附近の地形はかなり広大な草地で、その表面を均一にするために雑草を焼払い、さらにその一部分の表土の上部および全部を削り取つた状態、すなわち壤土および心土を平らに露出させたものである。

観測は 24 日, 25 日および 28 日の 3 日間おこなつたが、初めの 2 日は壤土について、最後の 1 日だけは心土について測定した。このほか、土壌の表面に霜柱として析出した水分も、単位面積当りについてその量を秤量し、析出水量として mm で見積つた。

以上の方法で求めた蒸発量の計算過程およびその値と、霜柱による析出水量を第 1 表に示した。なお第 1 表で θ_1, θ_2 および θ_3 は夫々土壌の表面より深さ 1cm まで, 1cm より 2cm まで, 2cm より 3cm までの土壌を前報告と同じ採土円筒を使つて採土した。しかし土壌不均一により、一定容積の採土困難のため、土壌の仮比重 ρ は平均値の採用を余儀なくされた。

* 1958 年 6 月 20 日 関東支部例会において発表

第 1 表 水分傾度より蒸発量の推定結果及び秤量による蒸発量

時	土 壌 水 分 Moisture content on wet soil. %			水 分 量 Moisture content on unite volume.			$\frac{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2 - 2\theta_3 \rho_3}{(AZ)^2}$ $A =$	$B = \frac{\Delta \theta \rho_2}{\Delta t}$	$D = \frac{B}{A}$	$\frac{\Delta \theta}{\Delta Z}$	蒸 発 量 $\frac{\partial \theta}{\partial Z} \rho \cdot 10$ (mm)	秤量による蒸発量 (g)	秤量による蒸発量 (mm/cm ²)
	θ_1	θ_2	θ_3	$\theta_1 \rho_1$	$\theta_2 \rho_2$	$\theta_3 \rho_3$							
24 th Nov. (loam)	5	58.9	41.3	57.1	0.530	0.372	0.514						
	6	40.5	42.5	44.0	0.365	0.382	0.396				(0.31)		
	7	41.9	42.1	42.6	0.377	0.379	0.373	-0.008			(1.50)		
	8	43.3	43.7	43.0	0.390	0.393	0.387	-0.009			(0.50)		
	9	43.1	44.0	44.6	0.388	0.396	0.401	-0.003	0.0015	0.50	0.0065	0.0325	...
	10	41.9	43.6	43.9	0.377	0.392	0.395	-0.012	0.0075	0.62	0.0090	0.0450	...
	11	40.8	42.0	42.7	0.367	0.380	0.384	-0.009	0.0100	1.11	0.0085	0.0944	...
	12	38.1	40.5	42.0	0.343	0.365	0.378	-0.009	0.0100	1.11	0.0175	0.1943	8.0
	13	36.5	39.2	41.4	0.330	0.357	0.373	-0.011	0.0070	0.63	0.0215	0.1355	8.0
	14	41.8	43.9	44.7	0.378	0.395	0.402	-0.010	0.0080	0.80	0.0120	0.0860	6.5
	15	41.0	43.0	43.5	0.369	0.387	0.392	-0.013	0.0095	0.73	0.0115	0.0890	4.0
	16	39.5	41.8	42.6	0.359	0.376	0.383	-0.010	0.0090	0.90	0.0120	0.1080	2.0
	17	38.7	40.7	41.7	0.348	0.366	0.375	-0.009	0.0060	0.67	0.0135	0.9805	1.5
	18	40.7	41.1	41.6	0.366	0.370	0.374	-0.000			(0.10)	0.5	0.01
	19	42.4	48.8	45.7	0.382	0.439	0.413	+0.083			(0.12)		
ρ_1, ρ_2, ρ_3 は夫々平均値 0.9 を採用 () は霜柱量 mm/cm ²													
25 th Nov (loam)	6 15	48.18	47.43	46.97	0.4963	0.4885	0.4838				(1.00)	0.0	...
	7	48.76	48.15		0.5022	0.4959					(0.90)	0.0	...
	8	46.45	49.57	50.16	0.4784	0.5106	0.5166				(0.07)	0.0	...
	9	50.20	49.63	49.60	0.5171	0.5112	0.5109	(-0.0083)			—	4.0	0.08
	10	47.55	48.74	49.12	0.4898	0.5020	0.5059	-0.011	(1.32)	0.00805	0.106	7.0	0.14
	11	46.00	47.60	48.80	0.4738	0.4903	0.5026	-0.0042	-0.013	2.62	0.01420	0.372	8.0
	12	45.62	46.18	46.41	0.4699	0.4757	0.4780	-0.0035	-0.014	4.00	0.0041	0.164	5.5
	13	39.69	42.20	42.74	0.4088	0.4347	0.4402	-0.0204	-0.041	2.00	0.01570	0.314	6.5
	14	38.56	40.80	41.50	0.3972	0.4162	0.4275	-0.0177	-0.0303	1.70	0.00930	0.158	5.5
	15	39.00	40.21	40.81	0.4017	0.4142	0.4203	-0.0064	-0.0160	2.50	0.00930	0.233	3.5
	16	41.46	43.17	45.24	0.4270	0.4447	0.4660					1.5	0.03
	17	43.76	46.24	46.11	0.4507	0.4163	0.4749					0.5	0.01
	18	43.47	...	45.17	0.4477	...	0.4653				Dew	1.5	0.03
	19	40.49	41.26	...	0.4963	0.4885	0.4838				Dew	0.5	0.01
ρ_1, ρ_2, ρ_3 は夫々平均値 1.03 () は霜柱量 mm/cm ²													
28 th Nov. (clay)	7	50.03	48.30	49.15	0.6104	0.6327	0.6439					0.5	0.012
	8	49.18	49.24	48.95	0.6000	0.6450	0.6412					0.0	0.000
	9	48.60	48.72	49.37	0.5929	0.6382	0.6400	-0.0435	-0.0053	0.12	0.0236	3.0	0.060
	10	48.30	48.51	48.81	0.5893	0.6355	0.6394	-0.0423	-0.0026	0.07	0.0251	8.0	0.163
	11	48.05	48.45	49.10	0.5862	0.6325	0.6432	-0.0356	-0.0030	0.14	0.0285	0.0400	10.5
	12	47.86	48.10	48.19	0.5839	0.6301	0.6313	-0.0450	-0.0080	0.18	0.0287	0.0508	9.5
	13	47.54	47.76	47.77	0.5800	0.6257	0.6258	-0.0456	-0.0030	0.07	0.0229	0.0160	10.8
	14	48.07	48.21	48.33	0.5865	0.6316	0.6331	-0.0436	-0.0020	0.05	0.0233	0.0117	3.0
	15	47.50	47.91	47.25	0.5795	0.6276	0.6190	-0.1020	-0.0044	0.04	0.0198	0.0080	4.5
	16	48.63	48.02	47.77	0.5933	0.6291	0.6258						
	17	48.64	48.21	48.21	0.5934	0.6316	0.6316						
ρ_1, ρ_2, ρ_3 は夫々平均値 1.22, 1.31, 131													

また第 1 表の蒸発量と (3) 式および (4) 式の方法より求めた蒸発量の比較、および霜柱の日変化を第 2 図に示した。

これを 24 日の結果についてみると、筆者等の方法によつて推定した蒸発量の変化は、土壤直接秤量による値および (4) 式よりの推定値とよく似ているが、(3) 式の値はこれらよりかなり小さい値となつてゐる。

次に 25 日の場合は比較的雲量の変化が多かつたため蒸発量も変動が大きいが、しかし傾向としては (4) 式の値にかなり近く、土壤直接秤量による値はこれらよりも小さくでゐる。また (3) 式は 24 日の場合と同じく全般的に小さい。ところが 28 日になるとこれらと逆で

卓越した。

また土壤直接秤量に使用する円壺内 6 ケ所の土壤水分と、外部 3 ケ所の土壤水分を測定した結果は第 2 表のようになつてゐる。

第 2 表によると、円壺内部は全般的に外部より乾燥している。これは土壤が有底な円壺につめられているため、外部との毛管が断ち切れて下方よりの水分補給がない結果と思われる。

霜柱として析出した水量も第 2 図に示したがその量は

(3) 式と秤量による値は大きく、(4) 式と土壤水分傾度よりの推定値が小さいが、両者はかなり類似している。

総括的に言えば筆者等の測定値と (4) 式による値とはよく合致するが、土壤直接秤量による値や (3) 式による値とはかなりの差異がある。このように我々の測定値が (4) 式の値とよく一致することは、我々の測定方法や (4) 式による方法は、いづれも原理的に見ると小地域の土壤面蒸発量を推定するのに好都合な方法であるからであろう。これに対して (3) 式は元来自由水面に適応されるべき式であり、少くともかなり広大な地域の蒸発散量をよく表現するものとして使用されている。したがつて不均一な小地域に使用する場合は、周囲よりの移流などが起り得るから、筆者等の計算値に合致しないのは当然かもしれない。事実この場合も 24 日、25 日は北寄りの風が吹いたが 28 日には南風が時々

Fig. 2. Comparison of Evaporation from a soil surface estimated from various methods

第2表 鉄製円溝内外の土壌水分 (11月26日15時)

測定部位	土 壌 水 分 %			
	1	2	3	平均
外 部	41.4	41.0	43.3	41.9
円 溝 の 中 心	35.0	36.4	38.3	36.6
円溝外周より内部へ1cm	32.0	33.5	33.0	32.8

意外に多く、特に24日の観測によれば最高15mmの水量に相当する。なおこの時の土壌中の水分のプロファイルを見ると、蒸発が盛んな日中の場合と同じ分布をしており、これが日出後融けて再び土壌中に侵入するため内部の水分が急激に増大している。

これから見ても霜柱が土中の水分輸送に果している役割はゆるがせにできないものである。

3. 後 記

Philip および De Vries は、土壌中の水分移動を詳細に記述する一般式として、液相および蒸気相の移動が温度場や水分場の影響を考慮に入れる必要があるとして次式を提出している。

$$\partial\theta/\partial t = \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \partial K / \partial Z \dots (5)$$

上式で θ は土壌の単位容積中の水分量、 D_θ は土壌の水分拡散係数で、これと水分との関係は第3図の左のとおりに変化する。また D_T は温度拡散係数でこれも水分によつて変化するが (第3図中央) 水分の比較的大きい範囲ではあまり変化しない。さらにまた K は水分伝導

Fig. 3. D_θ , D_T and K : all as function of moisture content for Yolo light clay at 20°C (after Philip and De Vries.)

Moisture content on unit volume

度 (Hydraulic Conductivity) でこれも第3図右のように水分とともに変化している。

上式でもし土壌の薄層や内部の問題を取扱う限り、土

壤中の温度場の影響が無視できる場合には(5)式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla (D_{\theta} \nabla \theta) + \partial K / \partial Z \dots \dots \dots (6)$$

となる。

また第3図(中央)のとおり K も θ の函数であるが、薄層を取扱い、土層に水分傾度がさほど大きくない場合には、 $\partial K / \partial Z$ は殆ど無視することができる。したがって第6式は $\partial \theta / \partial t = \nabla (D_{\theta} \nabla \theta) \dots \dots \dots (7)$ となり、近似計算としての水分移動を記述する一般式は、熱流を表わす筆者等の式と全く同じものになる。ただし D_{θ} の値が第3図左に示したとおり、 θ と共にかなり変化する場合には(7)式の簡単な解は求められず、筆者等の方法から蒸発量を求めることは不可能になる。

参考文献

- 1) 鈴木清太郎・丸山栄三

土壌面蒸発を土壌水分の傾度より推定する方法(序報) 農業気象 13巻2号

- 2) J. R. Philip & D. A. De Vries :
Moisture Movement in Porous Material under Temperature Gradient.
Transaction American Geophy. Union. 1957. 38, 2.
- 3) J. R. Philip :
Evaporation, Moisture and Heat Field in the Soil. J. Met. 1955.
- 4) H. L. Penman :
Laboratory Experiments on Evaporation from Fallow Soil.
J. Agr. Soc. 1931.
- 5) J. R. Philip :
An Infiltration Equation with Physical Significance. Soil Sci. 77, 1954. a.

Summary

The report on the possibility of computing the amount of evaporation from the soil surface using the vertical moisture gradient measured in the soil was made in the previous experimental study (Suzuki, S and Maruyama, E. 1957).

We measured the evaporation from the surface of loam-and clay-soil by the method mentioned in the previous report, in the vast plain field attached to the Aero-Meteorological Observatory, Tateno in Ibaragi Prefecture, and at the same time in order to check the actual amount of evaporation from the same soil, we weighted hourly a steel cylinder vessel containing loam and clay-soil in it imbedded in the earth of the same soil structure.

Those two methods led to the vary same values. At the same time the values were found coincided with the ones estimated from the vertical gradient of vapour density in the atmosphere near the ground which was observed by another member of our observation group in the neighbourhood of the Observatory.

It was of much interest that the values calculated by means of Thornthwaite-Holtzman's formula referred to the vertical distributions of wind-velocity, relative humidity and temperature, which were observed by the same group and in the same place, were found considerably different from ours.

本 会 記 事

北海道支部第8回総会並びに第12回例会報告

昭和34年11月21日午前10時より北大農学部において開催され、下記の如き研究発表がなされた。参加者は35名であつた。なお総会において役員の変更が行われた(結果省略)

1. 温水池の熱効率の定義について
(北農試) 千葉 豪
2. 農場内における気象条件の差異について
(北大農) 横田廉一, 前田隆, 石橋 惇, 秋田谷英次
3. 冷水灌漑地帯における水田の温度
(支部長) 八 鍛 利 助
(山形大農) 羽根田栄四郎

4. イロリに関する調査研究
(北大農) 横田廉一, (鳥取大農) 尾崎 繁
(佐用農高) 篠原弘巳
5. 南空知における水稻水害の被害様相について
(札幌調指導官室) 山田 正
6. 沙流川の水温について(Ⅱ)
(北大農) 前田 隆, (道土地改良課) 池田 実
7. W. M. O. CAg M の共同研究報告
第1報 地温の観測について(序報)
(支部長) 八鍛利助
(札幌気象台) 石井幸夫, 菅原 和
8. 波状試験における風蝕の実態について
(北海道開発局) 湯川邦三
(北農試) 藤原 忠, 大根田襄
楠瀬昌彦