

# 蒸発散位とその推定

久保次郎

## 1 蒸発散位

ある一つの畑、またある土地全体からの蒸発は、広い植物被ふく面からの蒸発である。そして植物被ふく面からの蒸発は、土壌面蒸発と植物の蒸散の総合であるからとくに蒸発散ともいっている。蒸発散量は水面蒸発の場合と同じように日射、気温、風、温度の影響を受けることはもちろんであるが、さらにそのときの土壌の含水量の影響も受け、水の供給が十分な場合、すなわち土壌が圃場容水量を持つ場合、蒸発散量は気象条件に応じた最大量に達する。

このようなことから、実際に起っている蒸発散量と、水の供給が十分な場合の蒸発散量とは、当然区別して考えなくてはならず、この後者の場合をとくに Thornthwaite は蒸発散位 (Potential Evapotranspiration) と名付けたのである。

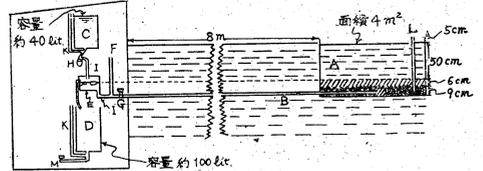
蒸発散位の定義は、すでに Thornthwaite により発表されている幾多の論文の中に示されているように、「常に土壌中に、植物が利用できる水が十分ある場合、完全に植物でおゝれた面から失われる水の量である」とされる。

蒸発散位と降水量とを比較することにより気候の乾湿を判定することができ、さらに蒸発散位と降水量と地中の水分 (最大量を仮定する) から水の過不足を明らかにすることができるから、蒸発散位を知ることができれば気候学上、産業上、いろいろな問題を解決することができる。

蒸発散位を直接測定するには蒸発散計 (Evapotranspirometer) を用いるのがよく、現在 America, Canada その他世界の数ヶ国で、蒸発散位の測定が行われているが、日本ではまだ行われていない。しかし、ある土地の気温、緯度がわかれば、蒸発散位を推定しうする方法が Thornthwaite により案出されていて、この方法が蒸発散位の測定値のない場所に対して広く適用されている。

気候的にみた蒸発散位の分布や水の過不足についてはすでに世界各地につき Thornthwaite<sup>(3)(4)</sup>により論じられており、日本については関口氏<sup>(5)(6)(7)</sup>により論じられている。

## 2 蒸発散計



第1図 蒸発散計設備 (Thornthwaiteによる)  
A: 土壌タンク, B: 給排水管, C: 給水タンク  
D: 気泡放出用ガラス管, G, F: 停止弁, H: 沈澱槽, I: プラスチック製連結管, L: 地下水面測定管, K: ガラス製水位測定管

蒸発散位を測定するための蒸発散計は、原理は土壌の滲透性を測定するライシメーター (Lysimeter) と全く同じであるが、現在種々の型が考案され、実用されている。しかし、すべて Thornthwaite の考案したものが基本となっている。

Thornthwaite の蒸発散計<sup>(3)(4)(5)</sup>は第1図に示したように、土壌タンク、給水タンク、排水タンクからなっている。土壌タンク表面には、周囲の畑と全く同じように、同じ植物が植えてある。そして、給排水装置により常に土壌タンク中の地下水面は一定の深さ (50cm, 35cm) に保たれるようになっている。

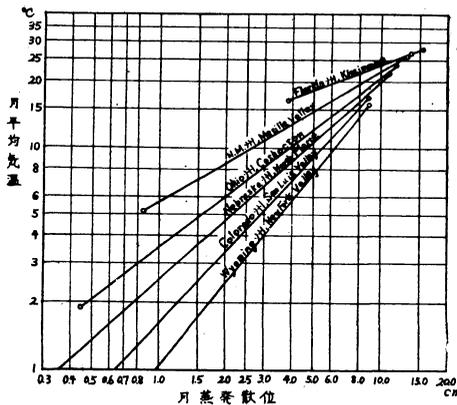
今、ある期間 (1週間, 10日, 1ヶ月など) を考え、その期間中の降水量を  $P$ 、蒸発散量を  $E$ 、給水量を  $I$ 、排水量を  $D$  とすると  $E = P + I - D$  という関係が成立つから、 $P$ 、 $I$ 、 $D$  を測定することにより、容易に蒸発散量を知ることができる。

なお、蒸発散位の測定の場合、最も注意しなければならない点は、土壌タンク内の土壌水分と周囲の畑 (試験地) の土壌水分が、だいたい同じ値になっていなければならないことである。このためタンク周囲の畑は適当な灌漑を行わねばならない場合も多く、またこのような畑について気象観測が行われなければならない。

## 3 蒸発散位と気温との関係

America 各地における、蒸発散位の測定結果から、Thornthwaite は月蒸発散位を1ヶ月の日数を30日、1日の日照時間を12時間の状態に補正してみると、月蒸発散位 ( $e$ ) と月平均気温 ( $t$ ) とが密接な関係にあることを見出した。すなわち、第2図に一例を示したように

$$e = at^c \dots \dots \dots (1)$$



第2図 America の各地における月平均気温と月蒸発散位の関係(Thorthwaiteによる)

という関係が示される。a, c は常数であるが、ともに場所によってその値は異なり、寒冷地に小さく、温暖地に大きい。また図からも明らかなように気温 26.5°C で蒸発散位は 13.5cm に収斂する。このような(1)式の常数に対する二つの法則が判明したので、実際に利用できる蒸発散位の推定式を完成することが可能になった。

4 蒸発散位の推定

蒸発散位の推定式は(1)式が基本であるが、この式の常数 a, c を決定しなければならない。このため、現在、Thorntwaite により発表されている方法は次のとおりである。まず各地の月平均気温 (平年値) (T) から、 $(\frac{T}{5})^{1.514} = i$  を各月に対して計算し、この12ヶ月に対する i の値の総合計  $\sum i$  を求める。  $\sum i = I$  として、この I を各地の熱的指数 (Heat Index) とよんでいる。そして常数 a は I の3次式で示すことができ、常数 c は I と逆に変化することがわかった。結局、求められた推定式は次のような式である。

$$e = 1.6 (10t/I)^a \dots\dots\dots(2)$$

t: 気温 °C e: 蒸発散位 cm である。

実際に(2)式を各地について計算する場合、その計算は非常に面倒であるから、あらかじめ表と、ノモグラムを作っておくとよい。

まず第1は、i と T との表である。たとえば第1表に

第1表 T から i を求める表

T	i	T	i	T	i
0	—				
1	0.09	11	3.30	21	8.78
2	0.25	12	3.76	22	9.42
3	0.46	13	4.25	23	10.08
4	0.71	14	4.75	24	10.75
5	1.00	15	5.28	25	11.44
6	1.32	16	5.82	26	12.13
7	1.66	17	6.38	27	12.85
8	2.04	18	6.95	28	13.58
9	2.44	19	7.55	29	14.32
10	2.86	20	8.16	30	15.07

示したようなものであるが、実際に使うものとしては、Tの10分位の加わったものが必要であるが、紙面の都合ではふくことにする。

とにかく、このような表を作っておくと、気温から直ちに  $\sum i$  すなわち I の値が容易に求められる。

一例として、日本の26地点についての I の値を第2表に示しておく。

第2表 日本の26地点についての I の値

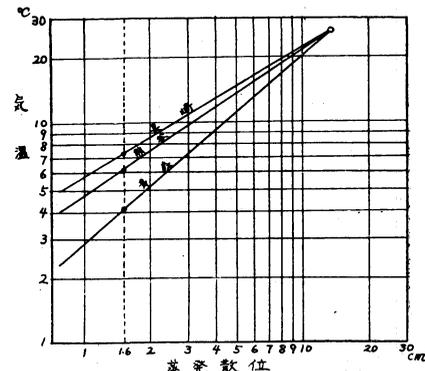
地点名	I	地点名	I	地点名	I
青森	40.94	金沢	60.13	和歌山	71.98
水戸	45.60	甲府	61.87	岡山	68.21
福島	53.55	長野	60.91	広島	68.16
水戸	56.42	浜松	70.10	多摩	71.31
前橋	59.34	名古屋	66.82	松山	69.38
熊谷	60.97	谷津	67.28	福岡	69.11
東京	64.30	大阪	71.17	佐賀	72.66
横浜	65.65	神戸	70.74	長崎	73.19
銚子	66.62	樺原	66.22		

次に(2)式をふたたび見てみよう。I の値がわかったから(2)式で  $10t = I$  であれば  $e = 1.6$  となる。すなわち、 $t = I/10^\circ\text{C}$  で  $e = 1.6\text{cm}$  という関係と、すでにのべた  $t = 26.5^\circ\text{C}$  で  $e = 23.5\text{cm}$  という関係から容易に e と t のノモグラムを作ることができる。

すなわち、第3図に例を示したように、log e, log t グラフで  $t = 26.5^\circ\text{C}$  で  $e = 13.5\text{cm}$  の点と、 $t = I/10^\circ\text{C}$  で  $e = 1.6\text{cm}$  の2点を通る直線が、各地に対する  $e = 1.6 (10t/I)^a$  の式を表わす。

とくに上のようなノモグラムを作らなくとも e と t の関係式を作ってもよい。たとえば、熊谷に対しては、 $\log e = 1.45 \log t - 0.93$  というように示される。

以上の方法で蒸発散位が求められるが、ここで求められた蒸発散位は前項で述べたように、1ヶ月の日数を30日、1日の日照時間を12時間とした場合の蒸発散位 (cm) であるから、さらに実際の各月の日数と、一日の日照時間に逆に補正しなければならない。この補正は各地の緯度によって行われるが、北緯30度から40度までについての補正係数は第3表(9)のとおりである。



第3図 熊谷、長崎、青森についての気温と蒸発散位の関係

第3表 推定式から求めた蒸発散位に対する補正係数 (Thornthwaite の計算による)

月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N. Lat.												
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.04	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81

推定式から求められた蒸発散位に、その土地の緯度に対する第3表の補正係数を乗ずることによって、はじめて正しい各月の蒸発散位が求められるのである。

計算結果の一例を熊谷の1934年について示してみると第4表のようである。

第4表 熊谷の月平均気温と月蒸発散位 (1934年)

要素	月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
気温 °C		1.4	2.9	4.8	10.3	16.9	21.6	23.5	25.1	20.6	13.4	9.2	4.7
蒸発散位 cm		0.2	0.6	1.1	3.8	8.6	12.6	14.3	14.6	9.8	4.9	2.5	0.9

5 蒸発散位の測定側と推定値

(2)式による蒸発散位の推定値が蒸発散計による蒸発散位の測定値にどの程度近いものであるかは第5表に示してある。畑地の灌漑計画のためには、いろいろな作物についての蒸発散位が必要であるが、Thornthwaite 等の

現在の目的としている世界各地の気候の乾湿、世界の気候区分とゆう目的に対しては、草地についての蒸発散位が必要である。そして現在世界の十数ヶ所で草地に対する蒸発散位が測定され、また測定値に対して Thornthwaite の推定式による推定値が比較されている。

第5表 いろいろな作物を植えた畑と、草地に対する蒸発散位の測定値と推定値 (mm) New Jersey 州, Seabrook 1947~1950年 (C. W. Thornthwaite)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月				
1947	被ふく植物									←ホーレン草→							
	測定値									94	100						
1948	被ふく植物									←トーマロコシ→		←ホーレン草→					
	測定値									80	130	133	96	78	65	29	
1949	被ふく植物									←ホーレン草→		←エンドウマメ→		←ソラマメ→		←牧草, クローバー→	
	測定値	46	29	45	63	114	122	98	133	117	83	17	32				
1950	被ふく植物									←牧草, クローバー→							
	測定値	40	2	50	64	99	135	138	136	73	57	49	30				

第6表 各地における、草地に対する蒸発散位の測定値と推定値 (mm)

		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
U. S. A. New Jersey州 Seabrook 1952年 *	測定値	16	8	12	57	114	112	156	131	99	62	38	21
	推定値	10	6	14	51	80	133	161	134	93	45	24	7
Canada Ontario 州 Tronto 1949年 **	測定値					112	163	150	132	62	44	14	
	推定値					79	141	148	133	70	55	10	
Ireland Valentia 8~12月 1952年 1~7月 1953年 ***	測定値	11	7	36	53	40	61	92	92	59	36	8	3
	推定値	23	24	23	43	72	81	91	86	57	44	27	23
Canada Northwest-Territories Norman Well 1950年 **	測定値						88	133	79	16			
	推定値						89	123	81	15			

\* C. W. Thornthwaite と J. R. Mather, \*\* M. Sanderson, \*\*\* V. H. Guerrini の報告による。

そして、中緯度における蒸発散位の測定値から案出された Thornthwaite の推定式(2)式は、Canada の極地

でも、また赤道付近でも十分つかえることが判明した。なお草地に対する蒸発散位の測定値と推定値の比較を世

界の4地点を例にとって第6表に示した。

### 6 蒸発散位を用いての水分過不足の判定

各月の蒸発散位が求められると、これと降水量を比較することにより、各月の水の過不足を計算することができる。たゞこの場合、地中に貯蔵される水の量を決めなければならない。Thorntwaiteは、Americaにおける各種の植物の根が吸水する水量の実験結果を用いて、植物の根の範囲の土壤中に貯蔵される水の量は、降水量に

して月100mmが限度であることを明らかにした。この月100mmを基準にして、蒸発散位と降水量から水の過不足が計算できるのである。

今、早ばつの際の水不足を対象にして、1939年(昭和14年)の福岡県を例にとってみよう。福岡管区気象台の調べられたもの<sup>(10)</sup>によると、1939年は福岡県でも水稲のほゞ全生育期間(5月上旬~11月上旬)について早ばつであつて、第一級に属する早ばつとされている。

第7表 福岡, 1939年の水の過不足の計表

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
蒸発散位(mm)	7	9	24	52	87	120	172	157	110	67	35	13
降水量(mm)	69	80	102	148	41	80	99	69	76	147	80	10
貯蔵水分変化(mm)	0	0	0	0	-46	-40	-14	0	0	+80	+20	-3
貯蔵水分(mm)	100	100	100	100	54	14	0	0	0	80	100	97
蒸発散量(mm)	7	9	24	52	87	120	113	69	76	67	35	13
水不足量(mm)	0	0	0	0	0	0	59	88	34	0	0	0
水過剰量(mm)	62	71	78	96	0	0	0	0	0	0	25	0

それで、1939年の福岡についての蒸発散位、降水量、蒸発散量(実際に蒸発散したとみられる量)水の過不足を計算してみると第7表のようになる。表を説明してみると、1~4月は蒸発散位より降水量のほうが多く、過剰の水(降水量と蒸発散量の差)は流出し、地中に貯蔵される水分は変化なく、最大量100mmである。5、6月は、蒸発散位のほうが降水量より多く、その差は地中の貯蔵水分から補給される。従つて地中の貯蔵水分は少くなり、5月に54mm、6月14mmになる。そうして水の過不足がない。7月はふたたび蒸発散位のほうが、降水量より多く、この差の一部は6月に地中にのこつていた14mmにより補給され、そこで7月の地中の水分は0となる。実際の蒸発散量は、補給量14mmに降水量99mmを加えた113mmで、これと蒸発散位172mmとの差が水不足となつてあらわれる。8月も9月も、蒸発散量は降水量より多く、地中の貯蔵水分は7月から引続いて0であるから、降水量がそのまゝ蒸発散量となる。そして、8月に88mm、9月に34mmの水不足が生じている。10月になって、蒸発散位より降水量のほうが、やゝ多くなるが、その差80mmは、そのまゝ地中に貯蔵される。そして水の過不足はない。11月はふたたび蒸発散位より降水量のほうが多く、その差45mmのうち、20mmが地中に貯蔵され、地中の水分は100mmとなり、残る25mmが過剰となる。12月は蒸発散位より降水量のほうが3mm少く、地中水分は減少する。そして水の過不足はない。

以上のようにして水の過不足を計算することができるが、この過不足量はもちろん推定量であつて現実に起つている量とは差があるだろう。しかし、たとえば水の不足量を推定であつても求めることができれば、早ばつの程度を数量的に示すことができ、また一方、適当な灌溉水の使用時期と量を決定することもできるわけである。

### 文 献

- (1) Thorntwaite, C. W. : An Approach toward a Rational Classification of Climate, Geogr. Rev. 38, 55, 1948
- (2) 同上, 関口武訳 : 気候の合理的分類への道, 地理学評論 22, p. 279, 1949
- (3) Thorntwaite, C. W. : The Role of Evapotranspiration in Climate, Archiv für Met. Geophy, Bioclima. Serie B, III, 16, 1951
- (4) Thorntwaite, C. W. : The Water Balance in Tropical Climate, Bull. Amer. Met. Soc. 32, 166, 1951
- (5) 関口 武 : 日本各地の広域面からの蒸発量の分布 地理学評論 23, 57, 1950
- (6) 関口 武 : 気候的にみた日本各地の水の過不足, 地理学評論 23, 209, 1950
- (7) 関口 武 : 日本各地の気候の乾濕, 日本塩学会誌 5, 77, 1951
- (8) Mather, J. R. : Manual of Evapotranspiration, Micrometeorology of the Surface Layer of the Atmosphere, The Johns Hopkins Univ., Lab., of Climatology, Supplement to Interim Report No. 10, 1950
- (9) Mather, J. R. (Edited) : The Measurement of Potential Evapotranspiration, The Johns Hopkins Univ., Lab. of Climatology, Publications in Climatology, Vol. 7, No. 1. 1954
- (10) 昭和26年度における気象長期予報海況調査研究事業に関する報告 : 第2部, 冷および早ばつの地域的予想についての調査, 中央気象台, 1952

(中央気象台)