

砂丘地における蒸発散について

— 一般気象観測資料による蒸発散位の推定 —

矢野友久^{*}・長智男^{**}・林泰弘^{*}

Evapotranspiration in a Sand Dune Area — Estimates of Potential Evapotranspiration by Routine Meteorological Data —

Tomohisa YANO^{*}, Tosio CHO^{**} and Yasuhiro HAYASHI^{*}

**Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute*

Summary

The potential evapotranspiration in a sand dune area was estimated by the routine meteorological data (1952-1974) based on the air temperature method, the solar radiation method, the combination method and the pan evaporation method. The predicting methods were calibrated against the measured evapotranspiration from grass (1972-1973). The results obtained from the solar radiation method, the combination method and the pan evaporation method represented the similar seasonal pattern of the maximum values in August and of the smaller evapotranspiration in June due to the rainy season, rather than in May, while, in the air temperature method, the maximum values occurred in July and the values in June were larger than in May. The daily average evapotranspiration was 3.7 mm/day in the combination method, and 3.4 mm/day in the other three methods. It was felt that the combination method and the solar radiation method offered the best results for predicting the potential evapotranspiration. The pan evaporation method may be graded next, although the accuracy of estimates could be influenced with the siting. The air temperature method which is popularly used because of the data availability could be superior if calibrated against the seasonal meteorological conditions such as the ratio between actual to maximum bright sunshine hours and the relative humidity.

※砂丘利用研究施設水文かんがい部門

※※現在は九州大学農学部かんがい利水工学研究室

1. ま え が き

蒸発散量を気象要素によって推定する公式は種々提案されているが、それらの公式がもとめられた地域の条件（気象、作物、土壌ならびに栽培条件）と、異なる条件の地域に適用する場合、一般には、信頼度が低くなる。とくに、経験式については、それぞれ限られた気象要素にもとづいて算出されたものであり、条件によっては、推定式内に含まれない気象要素が蒸発散に強く影響することも考えられる。その場合、対象地域の条件に応じて、係数の値を補正するなどの配慮が必要となる。

FAOでは、種々の推定式の検討を行い、種々の条件下で適用できる方式を提案している²⁾。ここでは、砂丘利用研究施設における気象観測資料を用いて、FAOの提案に沿って計算を行い、砂丘地における蒸発散位の推定を試みた。

2. 気象要素による蒸発散位の推定

(1) 方法ならびに結果

蒸発散量は、気象条件（日射量、日照時数、気温、湿度、風速などの蒸発に関する条件）、ほ場における作物の条件（種類、生育段階、植栽密度などの蒸散に関する条件）、土壌の性質と含水状態などによって異なる。蒸発散量を気象要素のみによって推定するためには、蒸発散位の概念の導入が必要になる。蒸発散位については、種々の定義がなされているが、つぎに示すものももっとも厳密な定義であろう。すなわち、作物の高さが均一であり、完全な被覆状態のもとで活発に生育している低い緑色作物の広い耕地において、土壌水分が十分であることによって、主として気象条件のみによって決定される蒸発散量である⁵⁾⁷⁾。ここで、低い緑色作物とは、アルファルファのような牧草を対象としたものと解釈される。それぞれの作物がそれぞれ異なった蒸発散位を有すると考えることも可能であるが、従来から提案されている多くの推定式が牧草を対象作物としているために、蒸発散位の対象となる基準的な作物として、アルファルファのような牧草をとりあげたものと思われる。一方、各作物の蒸発散量は、ブラネィ・クリドル式の場合と同様に、牧草の蒸発散位に作物係

数を乗じて算定される。作物係数に影響する要素としては、作物の種類、播種の時期と生育期間の長さ、生育段階、とくに生育初期の気象条件、および降雨あるいはかんがいの回数あげられる。

FAOでは、種々の推定式を検討し、主として気温による方法、日射量による方法、組み合わせ法、計器蒸発量による方法を代表的なものとして推奨している。表-1は、FAOの提案をまとめたものである。FAOの提案は、表にみられるように、計器蒸発量を除いて、オリジナル式による算定値(X)を、それらの式を構成しない気象要素の影響を加味して、 $a + bX$ の形で補正している。計器蒸発量法については、通常行われているように、計器蒸発量にパン係数(Kp)を乗じて算定する。表の第2欄には、蒸発散位 ET_0 の推定式中の係数 a 、 b あるいは Kp に影響する条件を示し、その条件によって変化する係数の値の範囲を示した。

鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設では、1952年（昭和27年）以来、裸地条件下で気象観測が行われており、現在までに20数年の資料の蓄積がある。観測項目は、降水量、小型蒸発計蒸発量、日射量、日照時数、風速（高さ6m）、最高・最低気温、相対湿度、雲量、地温（地表面、深さ5、10、20、30、50、100cm）である。ここで、降水量、蒸発量は午前9時から24時間の値、日射量、日照時数、風速は零時から24時間の値、湿度、雲量、地温は午前9時の値を用いている。

各方法による蒸発散位の計算にあたって、気象観測値は月別日平均値を用いた。気温による方法において、平均気温は最高・最低気温の平均を用いた。年可照時数に対する日可照時数の割合は、緯度に応じて決まった値をとり、適当な気象用数表⁶⁾により決定できる。日射量による方法において、日射量の実測値が、ある年には異常に大きく、また、ある年には異常に小さいなど信頼性に乏しいことが判明したので、ここでは、次式⁴⁾により推定した。

$$R_s = (0.25 + 0.5 \cdot n/N) R_a$$

ここで、 R_s ：日射量、 R_a ：大気外放射量、 n/N ：日照率。組み合わせ法において、純放射量はつぎに示す経験式⁴⁾により推定した。

Table 1. The predicting methods for potential evapotranspiration

Methods	Factors a, b or Kp
<p>Air temperature method (1)* $f = p (0.46 t + 8.13)$ $ET_o = a + b \cdot f$ ET_o : potential ET (mm/day), t : av. air temp. (°C), p : mean % of annual daytime hrs., f : Blaney-Criddle factor (mm/day)</p>	<p>a = -2.60-1.65 b = 0.80-2.06 Factors influenced by : Min. rel. humidity Daytime wind speed Ratio of actual/possible sunshine hrs.</p>
<p>Solar radiation method (3)* $ET_o = a + b \cdot W \cdot R_s$ R_s : solar radiation (equivalent evaporation, mm/day), W : weighting factor according to air temp., $W = \Delta /$ $(\Delta + \gamma)$ Δ : rate of change of saturation vapor pres. with temp., γ : psychrometer const.</p>	<p>a = -0.3 b = 0.76-1.36 Factors influenced by : Mean rel. humidity Daytime wind speed</p>
<p>Combination method (4)* $ET_o^* = W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot d$ $ET_o = a + b \cdot ET_o^*$ ET_o* : estimates by original Penman equation (mm/day), R_n : net radiation (equivalent evaporation, mm/day), f(u) : wind function, $f(u) = 0.27(1 + 0.01 U_2)$ U₂ : wind speed at 2 m height (km/day), d : vapor pres. deficit (mb)</p>	<p>b = 1.2-0.3 Factors influenced by : Ratio of day/night wind Max. rel. humidity</p>
<p>Pan evaporation method $ET_o = K_p \cdot E_p$ E_p : pan evaporation (mm/day) K_p : pan coefficient</p>	<p>K_p = 0.35-0.85 (Class A pan) Factors influenced by : Av. rel. humidity Wind speed Siting</p>

* Numbers in parentheses refer to appended references.

$$R_n = (1 - \alpha) R_s$$

$$- \sigma T_k^4 (0.34 - 0.044 \sqrt{e})(0.1 + 0.9 \cdot n/N)$$

ここで、R_n : 純放射量, α : アルベド (0.25), σ : ステフエン・ボルツマン定数, T_k : 絶対温度, e : 水蒸気圧。また、高さ 2 m の風速は、風速の対数分布則を仮定して、6 m の風速から換算した。

推定式中の係数 a, b あるいは K_p の決定にあたっては、FAO の提案と異なった方法を用いた。1972 年 (昭和 47 年) および 1973 年 (48 年) において、排水取支型ライシメーターを用いて、牧草 (ケンタッキー 31 フェスクおよびオーチャードグラスの混植) の蒸発散量の実測を行った⁸⁾。両年における月別日蒸発散量の実測値と f, W · R_s, ET_o, E_p との関係を図 1 ~ 4 に示す。図には、相関係数 (r), 直線相関による推定式 (ET_o) および実測値と推定値に

よる標準誤差 (S_{xy}) を記入した。なお、1972 年および 1973 年の両年において、牧草の葉面積指数の範囲は 1.6 ~ 10.5 であった。相関係数はいずれも 0.96 ~ 0.97 であり、相関が強く、直線相関による推定値の推定精度は、2 年間の実測値に対して、全体的には、各方法とも大きな違いがないことを示した。

このようにして得られた蒸発散位の推定式を用いて、1952 年から 1974 年までの 23 年間に対して月別日蒸発散位の計算を行った。図 - 5 は、各方法によって推定した蒸発散位の平均値を示す。また、図 - 6 には、組み合わせ法による各年の推定値の変動を示した。年間平均値は、組み合わせ法において 3.7 mm/day となり、もっとも大きく、他の方法はいずれも 3.4 mm/day でほとんど違いがない。蒸発散位の季節変化は、気温による方法を除いた三つの方法ではほぼ同様な

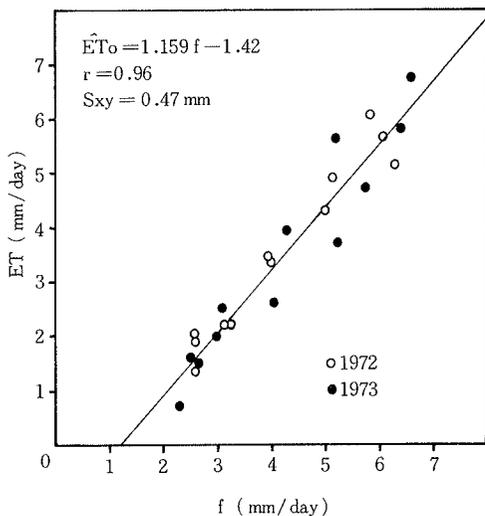


Fig. 1. Relationship between measured evapotranspiration (ET) and the Blaney-Criddle factor (f), 1972 and 1973. (Crop: Kentucky 31 fescue and orchard grass, Season: all the year, Leaf area index: 1.6 - 10.5) (Note: r means the correlation coefficient and Sxy means the standard error estimate, $\Sigma(ET - \hat{ET}_o)^2/n$).

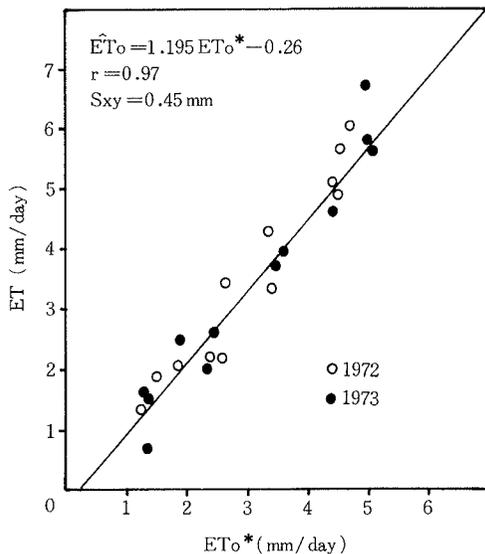


Fig. 3. Relationship between measured evapotranspiration (ET) and the estimated values by the combination method (ET_o^*), 1972 and 1973. (The measuring conditions and the symbols used are same with Fig. 1).

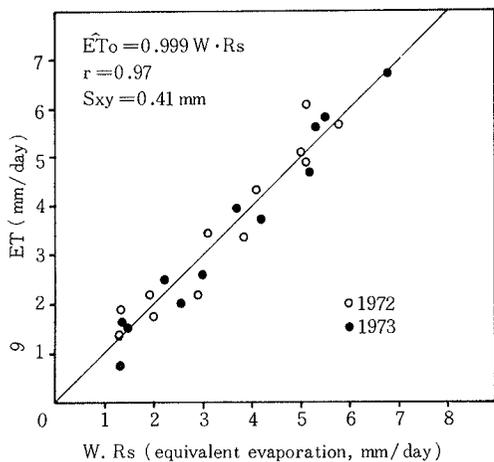


Fig. 2. Relationship between measured evapotranspiration (ET) and solar radiation weighted according to air temperature (W.Rs), 1972 and 1973. (The measuring conditions and the symbols used are same with Fig. 1).

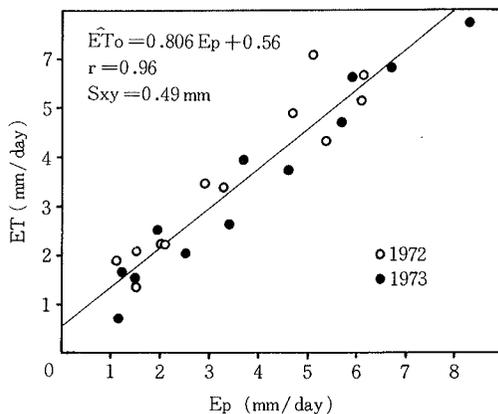


Fig. 4. Relationship between measured evapotranspiration (ET) and small pan evaporation (E_p), 1972 and 1973. (The measuring conditions and the symbols used are same with Fig. 1).

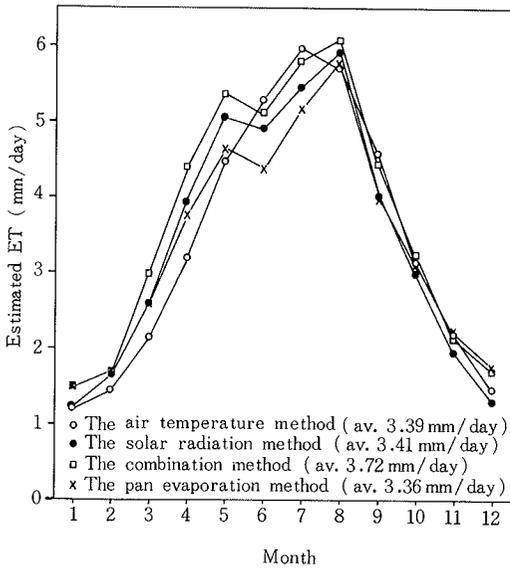


Fig. 5. Monthly evapotranspiration estimated by the different methods, 1952-1974.

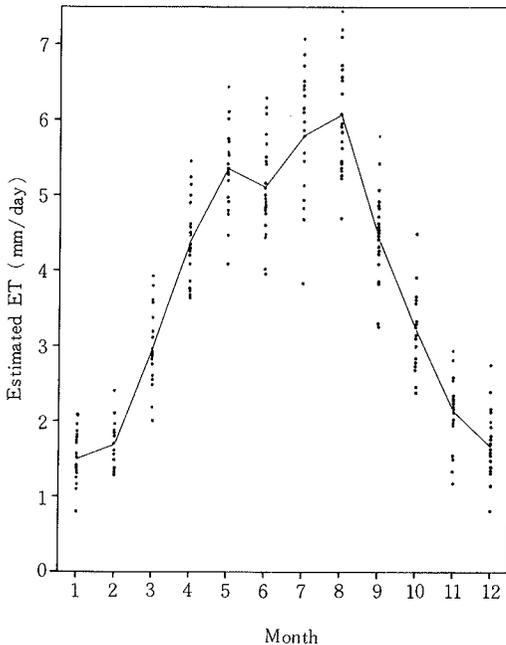


Fig. 6. Monthly variability and average values of estimated potential evapotranspiration by the combination method, 1952-1974.

傾向を示すが、気温法では7月にピーク値を示し、梅雨期で天候不良の6月において、蒸発散位の低下が認められない。月別日蒸発散位の各年における変動はいずれも大きく、最大値あるいは最小値は平均値の20~30%の範囲にも及ぶ。

(2) 考 察

気温による方法において、他の方法とは異なった蒸発散位の季節分布を示すのは、推定式内に気温と日照時数の二つの要素しか含んでいないことによる。すなわち、気温は5月より6月に高く、日照時数は年間ピーク値が6月に生ずるために、この推定式では、梅雨時の天候不良による蒸発散位の低下が数値の上であらわれなかったものである。また、平均気温の年間ピーク値は8月に生ずるが、7月との差はあまりないのに対して、日照時数は8月より7月に大きいため、年間のピーク蒸発散位が7月に生じたと考えられる。一般に、蒸発散量と気温との相関は強いが、両者に直接的な関係はなく、蒸発散量と日射量（あるいは純放射量）、日射量と気温との相互関係を通して間接的な関係を有すると言え、したがって、日本のように、年間にわたって天候の安定性がない気候条件に対しては、日射量の代りに、気温を主たる変数として蒸発散量を推定することは、精度の面で問題があろう。この計算の場合、2年間の実測値にもとづいて、係数 a , b を決定したために、年間にわたって同一の a , b を用いたが、季節に応じてその値を変えるなどの配慮をすれば、推定精度はまだ向上するものと思われる。

日射量による方法については、一般に、蒸発散量と日射量との間に強い相関があるために、日射量のみによって蒸発散量を推定する経験式も多く提案されている。しかし、両者の関係は、図-7にみられるように、季節ごとにみると、厳密には直線関係でなく、同じ日射量に対して、春よりも秋に蒸発散量が大きいというループ曲線を描く⁸⁾。これは、大気と土壌の貯熱期（春）においては、放熱期（秋）よりも太陽エネルギーが蒸発散に少なく使われるということによって説明できる。この“ループ効果”を除去するためには、蒸発散量と日射量との直線回帰式に気温または気温に関連する要素をパラメーターとして導入することが考えられ、この計算に用いた

方法はその一つであり、Makkinkにより提案されたものである³⁾。この方法は、つぎに示すように、組み合わせ法の簡略化されたものとみることができる。

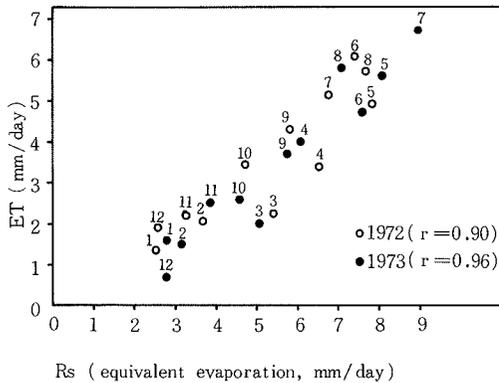


Fig. 7. Relationship between measured evapotranspiration (ET) and solar radiation (Rs), 1972 and 1973.

(Note: Numbers indicate the month).

組み合わせ法は、空気力学的方法と熱収支法を組み合わせたものであり、Penmanによって初めて提案されたために、ペンマン法とも呼ばれる⁴⁾。これは、推定式内の風速関数項が経験式であるが、推定式そのものが蒸発に関する理論的根拠をもっているため、一般には、もっともすぐれた方法と言われている。上記の日射量法は、組み合わせ法の第1項(放射項)の有効長波放射量を一定とし、第2項(乱流拡散項)に及ぼす気象要素の影響を一定とみなしたものに相当する。組み合わせ法と日射量法を比較すると、2年間の実測蒸発散量と ET_o^* および $W \cdot R_s$ の関係が、相関係数0.97でほぼ等しく、実測値と推定値との標準誤差がほぼ等しいのに対して、全期間に対して計算した場合、この二つの方法で推定値にかなりの違いが生じたのは、日射量法の推定式に含まれない気象要素(湿度、風速)の影響があらわれたと考えるか、推定式の係数 a 、 b を決定した2年間の気象条件が全期間を代表する条件とみなせなかったと考えるべきであろう。前者の場合、組み合わせ法が日射量法よりもすぐれていることの裏づけになる。しかし、蒸発散位の推定に用いた気象観測資料は、観測場所が過去数回変っており、また、付近の砂丘裸地

の植林などの植生状態の変化により、気象観測値自身が長期的変動を有している可能性があるために、2年間の実測値にもとづいて算定した推定式の係数を全期間に対して適用したことには、これら二つの方法だけでなく、全方法に対して、推定精度の面で問題がないとは言えない。したがって、組み合わせ法が日射量法よりすぐれていると断定することはできないように思われる。

一方、計器蒸発量は、日射量、気温、湿度、風速など蒸発に影響が強い気象要素の総合された指標であるので、蒸発散量に密接な関係を有する。計器蒸発量は、気象条件とともに、蒸発計の大きさ、形およびその設置条件(蒸発計が設置される周囲の植生の有無あるいは植生の広がり規模)に強く影響されるので、パン係数 K_p (あるいは直線回帰式の係数 a 、 b)の値の決定がむづかしく、その値によって蒸発散量の推定精度が左右される。前記のように、気象観測場所が過去数回変っており、とくに、計器蒸発量には、他の気象観測値に比べて、その影響が強くあらわれていると考えられ、2年間の実測値にもとづいて決定した推定式の係数を全期間に対して適用したために、組み合わせ法、日射量法に比べると推定精度は若干劣ると思われる。

3. 結 論

1952年から1974年までの一般気象観測資料を用いて、気温法、日射量法、組み合わせ法および計器蒸発量法により砂丘地における蒸発散位を算定した。計算にあたっては、2年間にわたって得られた牧草の実測蒸発散量とそれぞれのオリジナル推定式による推定値との直線相関式を用いた。

1. 気温法を除く三つの方法は、8月に蒸発散位のピーク値、6月に梅雨期に原因する蒸発散位の低下を示すという同様な季節分布を呈したが、気温法は、7月にピーク値を示し、6月の蒸発散位の低下を示さなかった。

2. 23年間の年間平均値は、組み合わせ法において3.7mm/dayでもっとも大きく、他の三つの方法において3.4mm/dayでほとんど違いがなかった。

3. 組み合わせ法は、その推定式が理論的根拠を有し、推定式内に多くの気象要素を含むために、蒸発

散位の推定精度がもっとも高いと言え、一方、日射量法は組み合わせ法の簡略化された方法とみることができるので、組み合わせ法に比べて、推定精度が劣ると考えられるが、ここでは、両者の優劣を断定できなかった。計器蒸発量法は、気象観測場所が過去数回変更されたことの影響を受けて、本例に限っては、その推定値の信頼度があまり高くないと考えられる。気温法は、その推定式に含まれる要素が気温と日照時数だけであるために、推定精度がもっとも劣ると思われる。

参 考 文 献

1. Blaney, H.F. and W.D. Criddle. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. US Dep. Agr. Serv., SCS-TP-96. p48.
2. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1975. Crop water requirements. Irrigation and drainage paper, FAO. 24:1-56.
3. Makkink, C.F. 1957. Ekzameno de la formula de Penman. Neth. J. Agr. Sci. 5:290-305.
4. Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. London Ser. A. 193:120-145.
5. Stanhill, G. 1965. The concept of potential evapotranspiration in arid zone agriculture. Proc. Montpellier Symp., UNESCO. p109.
6. 東京天文台(編). 1976. 理科年表. 丸善. 暦35-48.
7. 矢野友久・塩見文明・長 智男. 1974. 砂丘地における蒸発散について — 熱収支法による蒸発散量の推定. 鳥取大農研究報告. 26:100-106.
8. ————. 1975. 砂丘地の水収支. 土壤の物理性. 32:24-28.

