

鳥大農研報 (Bull. Fac. Agric., Tottori Univ.) 39 145~152 (1986)

砂丘地におけるグレインソルガムの 蒸発散量について

矢野友久*・小谷佳人*

昭和61年5月31日受付

Evapotranspiration from Grain Sorghum in a Sand Dune Area

Tomohisa YANO* and Yoshihito KODANI*

Measurement of daily evapotranspiration from grain sorghum in the Tottori sand dunes showed the maximum value of 7.1 mm/day during summer, although the daily values varied noticeably in accordance with the daily weather conditions. The weak correlation was obtained between the measured values and the calculated ones by the Penman method, because evapotranspiration was much influenced by the crop growth condition. The crop coefficient for potential evapotranspiration estimates was approximated by the linear equation with leaf area index as a variable. Daily evapotranspiration was estimated with relatively high accuracy by introducing the crop coefficient into the linear regression equation of the calculated value by the Penman method. The estimating accuracy was much improved by multiplying the correction factor calculated from the multi-regression equation as the variables of meteorological factors by the calculated values of the Penman method. The net radiation method and the solar radiation method were compared by the Penman method to estimate the accuracy. The similar estimating accuracy for the daily data was obtained among the three methods, although the net radiation method and the solar radiation method did not include wind speed and humidity terms which must have an effect on evapotranspiration.

I 緒 言

蒸発散量を気象要素によって推定する方法は種々提案されているが、Penman⁴⁾によって初めて提案されたペンマン法は最も推定精度が高いといわれている。しかしながら、作物の生長に対し十分な水分を与えた場合、すなわち、蒸発散位の状態であっても、作物の生育状態が蒸発散量に及ぼす影響は大きく、気象要素のみによって蒸発散量を正確に推定することは難しい。

本研究では、飼料作物のグレインソルガム (*Sorghum*

bicolor L. Moench) の日蒸発散量を計量型ライシメータによって測定し、ペンマン法による計算値に対して、作物の生育状態に関するパラメータを用いて補正を行うことによって、推定精度を向上させることを試みた。また、ペンマン法以外の方法も幾つか取り上げ、ペンマン法との推定精度の比較を試みた。

II 実 験 方 法

蒸発散量の実測は、大きさ20m×16mの圃場の中央に設置した計量型ライシメータ (直径2 m, 土層厚1.5m)

* 鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設水文かんがい部門
Sand Dune Research Institute, Faculty of Agriculture, Tottori University

を用いて行った。供試作物として、グレインソルガムを畝間30cm, 株間15cmで、ライシメータを中心として16m×14mに対して植栽した。播種は6月末に行い、蒸発散量の測定は7月初めから10月初めまで行った。同時に、ペンマン法による蒸発散位の計算に必要な純放射量を地表面上1.7m (植被面上1.3~0.7m)の高さで、気温、湿度および風速を植被面上1mの高さで測定した。また、直径1.2mの大型蒸発計蒸発量および日射量を隣接した気象観測露場で測定した。灌水は、深さ10cmに設置したテンシオメータの値で水頭200cm (pF2.3)を目安として夕方に行った。この結果、灌水は、降雨がない場合には、通常3日に1度または1日置きになった。

III 結果と考察

1. 日蒸発散量の変化

観測期間中の日蒸発散量の変化をFig. 1に示す。ここで、午前9時から24時間の値を日蒸発散量とした。降雨日においては、無降雨日に比べて蒸発散量の推定精度が低下するために、プロットから除外した。しかし、蒸発散がほとんどない夜間に降雨があった場合については、降雨があった時間を除いて、日蒸発散量とした。日蒸発散量は毎日の天候状態に応じて大きく変動するが、全体的な傾向としては、蒸発散のピーク時期の8月中旬まではゆるやかに増大し、ピーク時期以降はかなり急激に減

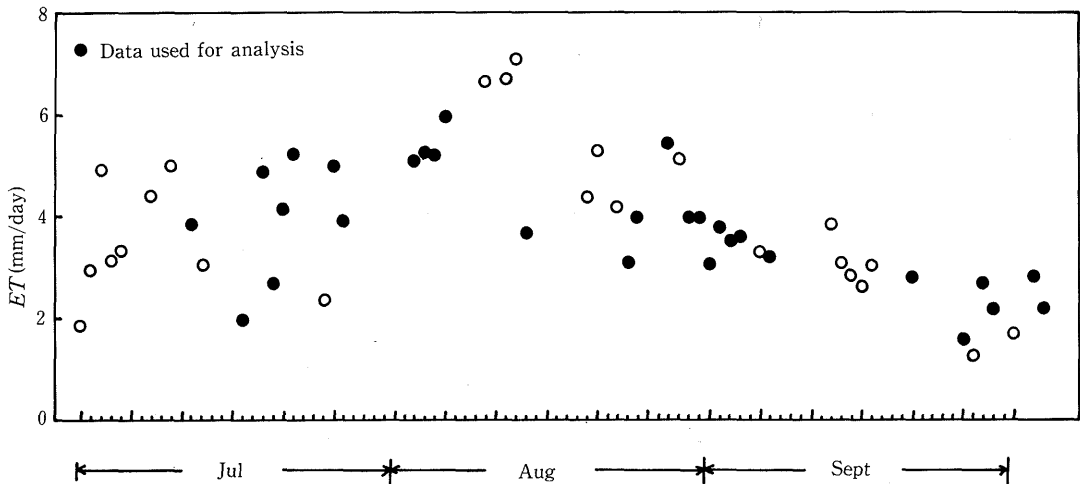


Fig. 1 Daily variations of evapotranspiration (ET) from grain sorghum.

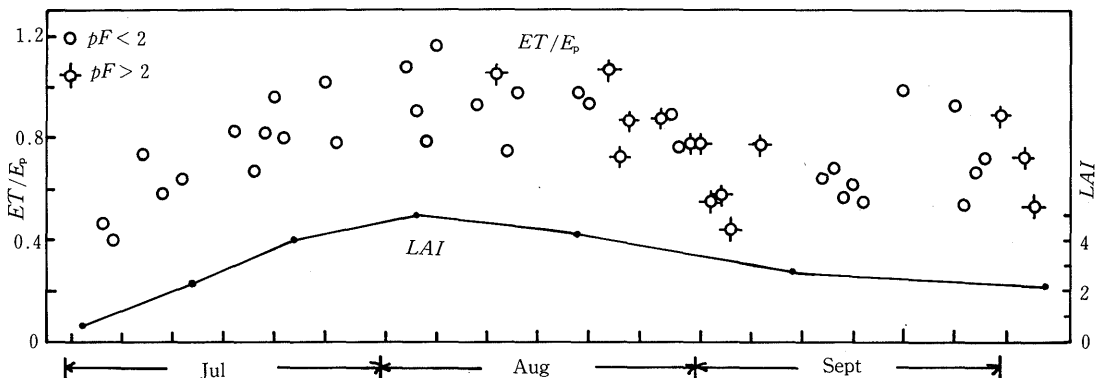


Fig. 2 Variations of evapotranspiration-pan evaporation ratio (ET/E_p) and leaf area index (LAI).

少する。日蒸発散量の最大値は7.1mmであった。なお、Fig. 1において、プロットした実測値の数は50個であるが、その中でペンマン法による計算に必要なデータの欠測がまったくない29個を今後の解析に用いることとし、Fig. 1に黒丸で示した。

蒸発散量は気象条件だけではなく、土壌水分状態ならびに作物の生育状態に影響される。得られた日蒸発散量に対して土壌水分ならびに作物の生育状態がどの程度影響しているかをみるために、日蒸発散量を蒸発計蒸発量で除した値をプロットしてみた (Fig. 2)。ここで、深さ10cmにおける土壌水分吸引圧が水頭100cmを越えた日のデ

ータは区別して示した。また、Fig. 2には葉面積指数の変化も示した。作物の葉面積指数は7月上旬の0.7から直線的に増大し、8月初めに最大値4.9を示した。縦軸の値、いわゆる蒸発散比は、毎日の変動が著しく大きいものの、葉面積指数の変化とほぼ対応した変化を示している。土壌水分の蒸発散に及ぼす影響については、灌水をpF 2.3程度で行っているため、全体的にはあまり認められない。しかし、8月終わりから9月初めにかけては、pF 2以上の値が5日連続して現れており、この時期には、土壌水分が蒸発散の制限要素となっているように思われる。

2. ペンマン法による蒸発散位の推定

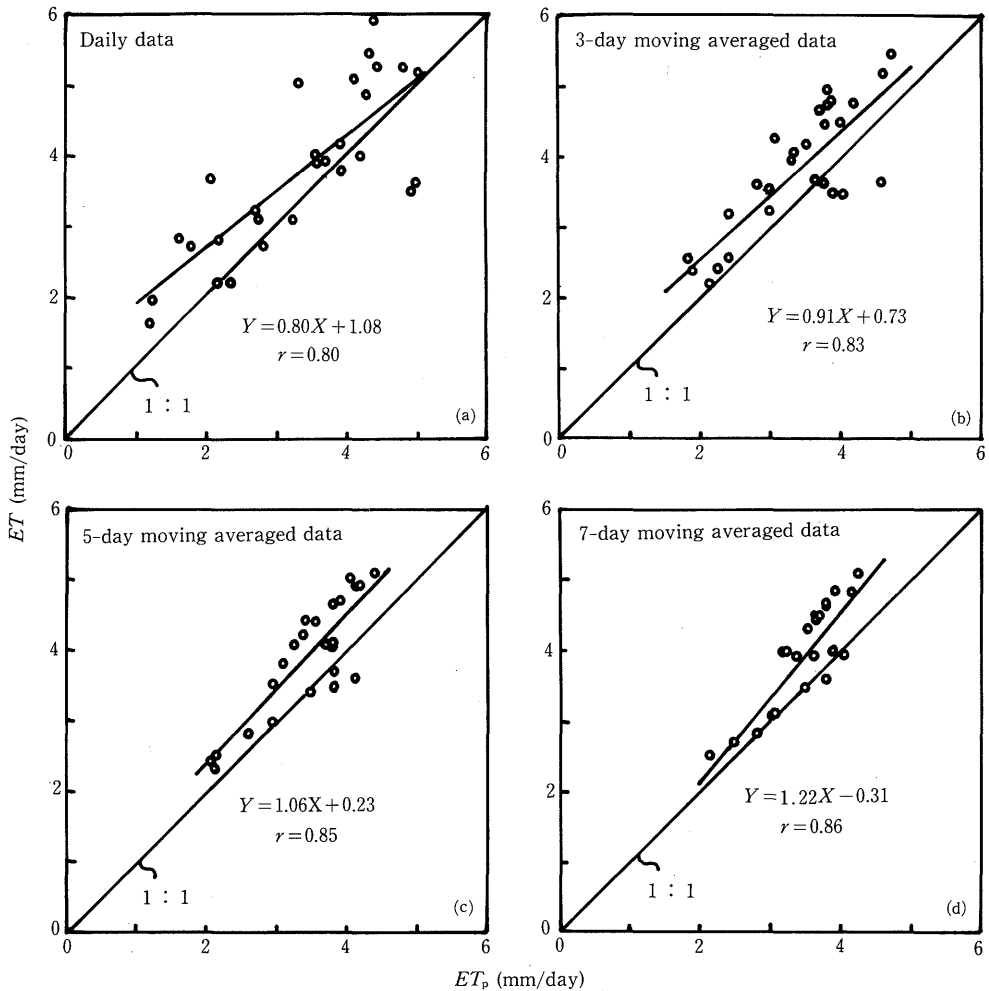


Fig. 3 Relationship between ET and the calculated values by the Penman method (ET_p). r denotes correlation coefficient.

ペンマン法による蒸発散位の推定式は、よく知られているように、次式で与えられる。

$$ET_p = \{\Delta \cdot R_n + \gamma \cdot f(u) \cdot d\} / (\Delta + \gamma) \quad \dots(1)$$

ここでは、 ET_p ：蒸発散位の計算値(mm/day)、 R_n ：純放射量(蒸発当量, mm/day)、 d ：飽差(mb)、 $f(u)$ ：風速関数(mm/day/mb)、 Δ ：飽和水蒸気圧～温度曲線の勾配(mb/°C)、 γ ：乾湿計定数(mb/°C)。風速関数については、Penman⁴⁾はオリジナル式において、次式を提案した。

$$f(u) = 0.26 (1 + U/160) \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 U ：高さ2 mでの風速(km/day)。DoorenbosおよびPruitt¹⁾は、世界各地での蒸発散位のデータを検討し、次の(3)式を提案した。

$$f(u) = 0.27 (1 + U/100) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここでは、この(3)式を用いて風速関数を計算することとした。

日気象データを用いて、ペンマン法による蒸発散位を計算してみた。ここで、計算に用いたデータは、前にも述べたように、計算に必要なデータがすべて揃った日の29個に限った。日蒸発散量の実測値(ET)と蒸発散位の計算値(ET_p)との関係をFig. 3(a)に示す。大部分のデータにおいて、実測値は計算値より大きいことを示し、両者の関係は、相関係数で0.80であり、直線回帰式による標準誤差は0.70mmであった。計算に用いたデータ29個の日平均値は3.76mmであるので、推定の際には、平均的に19%程度の誤差を伴うことになり、推定精度としては物足りない。DoorenbosおよびPruitt¹⁾は、ペンマン法で日蒸発散位を精度よく推定することは難しく、1週間程度以上の期間の平均値の場合に満足できる結果が得られるとしている。そこで、データの平均期間を長くしたときの推定精度の変化をみてみた。計算に用いた29個のデータは測定期間の中で離散的に生じたものであるが、ここでは、連続的に生じたものと同じとみなして、移動平均を用いることとした。移動平均の期間は3、5、7日とし、実測値と計算値との関係を、それぞれFig. 3(b)～(d)に示す。平均期間を長くすると、相関係数は若干大きくなり、7日間移動平均値に対して0.86であった。この場合、直線回帰式による標準誤差は0.38mmとなり、平均的には大体10%の誤差で推定できるといえる。日データに対する両者の低相関の原因としては土壌水分と作物の生育状態の変化の二つが考えられる。日データの代りにデータの平均期間を長くした場合には、土壌水分の影響は小さくなると考えられるが、Fig. 2の傾向からみて、29個のデータで考えた場合には、土壌水分と作物の生育状

態の両方ともに蒸発散量に影響を及ぼしていると判断される。

ペンマン法のような蒸発散位を推定する式に作物の生育状態に関する要素を導入するために、作物係数がよく用いられる。作物係数を K_c と表せば、各作物の様々な生育段階にある蒸発散位(ET_{crop})は、ペンマン法を初めとする各方法によって推定される値(ET_0)に K_c を乗じることによって求められる。

$$ET_{crop} = K_c \cdot ET_0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

この作物係数は作物の種類や生育時期によって異なる値をとる。

(4)式の左辺に蒸発散量の実測値を用い、ペンマン法による計算値との比(ET/ET_p)をとると、これが作物係数に相当し、作物の生育状態の関数とみなされるので、葉面積指数(LAI)との関係をみてみることにした。ここで、葉面積指数の実測値は観測全期間に対して7個しかないで、線形内挿法によってそれぞれの日の値を推定した。日データ、7日間移動平均値に対して、 ET/ET_p と LAI との関係を、それぞれFig. 4(a)、(b)に示す。両者の関係は著しくばらつき、相関係数は、それぞれ0.13、0.65であり、特に、日データの場合にはほとんど相関がみられない。両者の関係に対して直線式をあてはめた場合、 LAI の変化に対する直線式の値の変化の範囲は、それぞれ1.12～1.23、1.00～1.22となる。この値は、後で示すように、作物係数にある定数を乗じたものであり、ペンマン法による計算値に対する重みともいえる。この重みを用いて推定した結果、実測値と推定値との標準誤差は、それぞれ0.71mm、0.31mmとなり、重みをつけない場合、すなわちFig. 3の場合とほとんど差は生じなかった。

ペンマン法と同じようによく用いられる方法に計器蒸発量法があり、次式で表される。

$$ET_0 = K_p \cdot E_p \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 E_p ：計器蒸発量、 K_p ：蒸発計定数。ペンマン法の場合と同じように、比、 ET/E_p をとり、 LAI との関係をFig. 5(a)、(b)に示す。これによると、相関係数は、日データ、7日間移動平均値に対して、それぞれ0.52、0.89となり、Fig. 4の場合よりも直線相関の度合いが強いことを示している。この理由についてははっきりしないが、ペンマン法による計算値よりも計器蒸発量の変化の範囲が大きいことが原因の一つであろう。ペンマン法の場合と同様に、Fig. 5の結果を用いて蒸発散位を推定すると、標準誤差は、それぞれ、0.81mm、0.25mmとなった。

以上のように、蒸発散量の実測値とペンマン法による

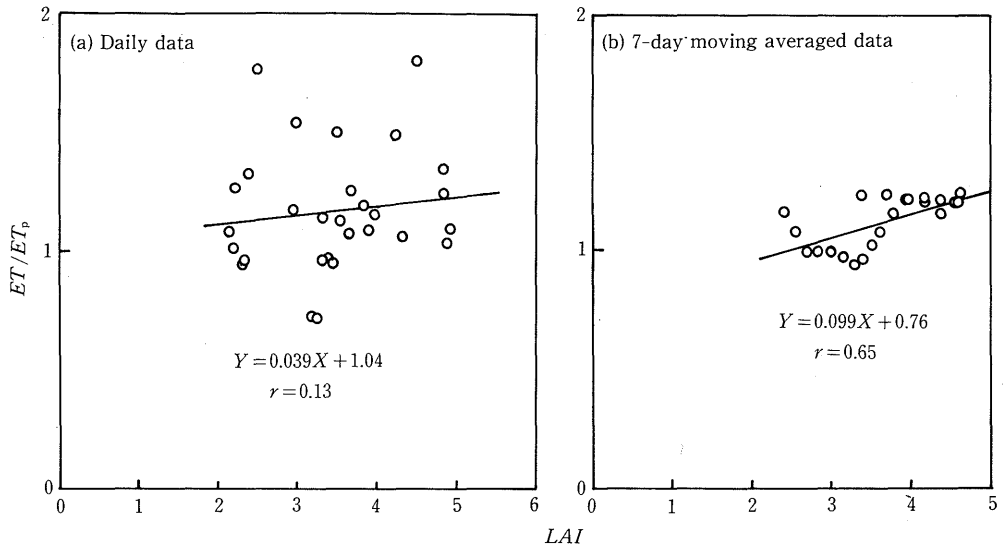


Fig. 4 Relationship between $ET-ET_p$ ratio and leaf area index (LAI).

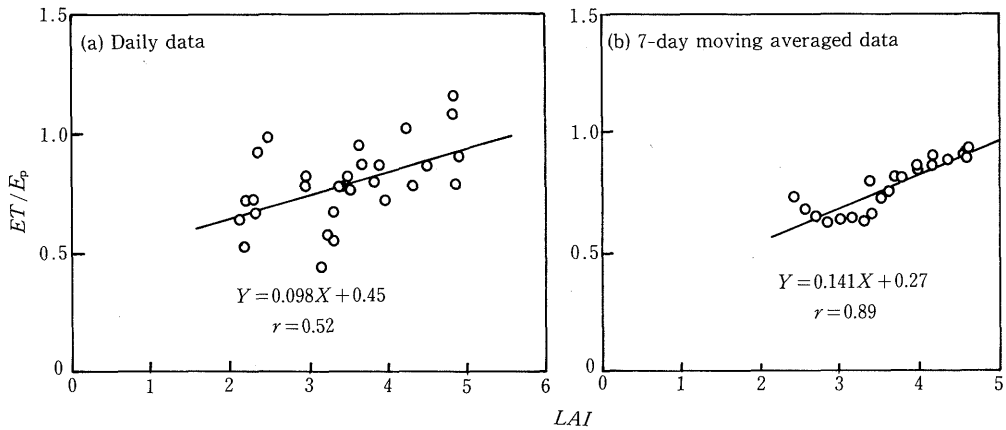


Fig. 5 Relationship between ET -pan evaporation ratio (ET/E_p) and leaf area index (LAI).

計算値あるいは計器蒸発量との比と葉面積指数との直線相関式をそのまま利用して蒸発散位を推定する場合にはあまりよい結果が得られないことがわかった。そこで、作物係数 (K_c) の推定には Fig. 5 を用い、得られた K_c とペンマン法による計算値 (ET_p) とから蒸発散位を推定してみた。Fig. 5 内に示した直線相関式は K_c と蒸発計定数 (K_p) の積に相当するので、まず、 K_p の値を決定しなければならない。ここでは、得られた葉面積指数の最大値の場合に K_c が 1 となるとして K_p の値を決定した。このよ

うにして得られた K_c の値を用いて、 ET/K_c と ET_p との関係のみをみた。この ET/K_c は (4) 式の右辺の ET_o に相当するものである。両者の相関係数は、日データ、7 日間移動平均値に対して、それぞれ 0.80、0.87 になり、相関係数自体は Fig. 3 に比べてあまり変わらないが、ここでは、蒸発散位を直線回帰式、 $K_c (a \cdot ET_p + b)$ によって推定した。実測値と推定値との関係を Fig. 6 に示す。実測値と推定値との標準誤差は、それぞれ 0.54mm、0.14mm となる。推定精度は、作物係数を考慮しない場合に比べて

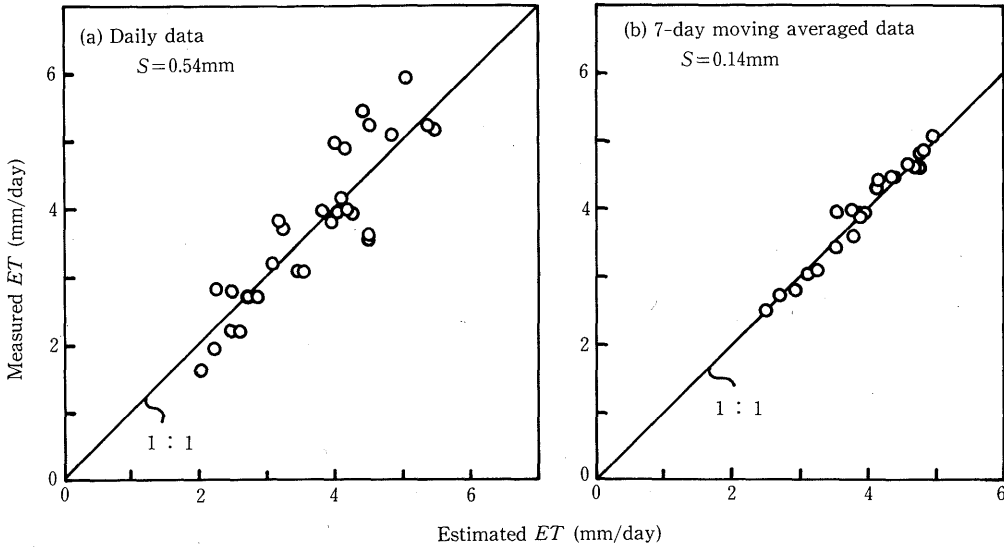


Fig. 6 Relationship between measured ET and estimated ET from regression equation of ET_p . S denotes standard error of estimate.

かなりよくなっている。 ET/ET_p あるいは ET/E_p と LAI との直線回帰式を用いて、直接的に蒸発散位を推定するよりもよい結果が得られたのは、 ET/E_p と LAI との関係から決定した作物係数 (K_c) を用いた ET/K_c とペンマン法の計算値 (ET_p) との直線回帰式の回帰係数を新たに計算することによって、標準誤差が小さくなったものであろう。すなわち、 ET/E_p と LAI との最適な回帰係数は $ET \sim (a \cdot LAI + b) E_p$ に対する最適な回帰係数とはいえないからであろう。

上に示した例にもみられるように、ペンマン法のオリジナル式による計算値そのもので蒸発散位を精度よく推定できることはあまりない。その理由は、蒸発散位は気象条件、作物条件だけでなく、圃場の条件にも大いに影響を受けるからである。また、蒸発散位の計算のための気象データのとりかたも影響がある。日蒸発散量は刻々の気象条件によって決定される蒸発散速度の累積値であるのに対して、実用的には日データを用いて日蒸発散量を計算する。例えば、風速や湿度が日中と夜間で大きく異なる場合には、これらの日平均値は単純平均値よりも日中のデータに重みをつけた平均値の方が望ましい。このような理由のために、ペンマン法を初めとする各方法による計算値そのもので蒸発散位を精度よく推定できることを期待するのは無理といえる。

本研究の場合はペンマン法による計算値に関する直線

回帰式によって作物係数が1の場合の蒸発散位が推定できるとしたが、一方、補正係数を単なる定数とせず、気象要素の関数とする方法も提案されている。DoorenbosおよびPruitt¹⁾は、蒸発散位に及ぼす風速および湿度の影響は蒸発能の高い発件でより著しいとして日射量の値によって、また、日中と夜間の湿度や風速の違いを考慮して、最高相対湿度および日中・夜間風速比の値によって補正係数を決定する方法を推奨し、これらのパラメータの値に応じて図的に補正係数を決定する方法を提案している。Frevertら²⁾はPruittおよびDoorenbosのデータを利用して、次に示す重回帰式を用いて補正係数を決定している。

$$ET_0 = K \cdot ET_p \dots\dots\dots(6)$$

$$K = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots\dots\dots + a_7 \cdot x_7 \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 x_1 : 最高相対湿度 (%), x_2 : 日射量 (蒸発当量, mm/day), x_3 : 日中風速 (m/sec), x_4 : 日中・夜間風速比, x_5 : $x_3 \cdot x_4$, x_6 : $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$, x_7 : $x_1 \cdot x_2 \cdot x_4$, a_1 : 回帰係数。説明変数 $x_5 \sim x_7$ は重相関係数が大きくなるように各説明変数の積の項を付け加えたものである。

まず、(7)式において、提案された回帰係数をそのまま用いて補正係数を決定することによって、推定精度が向上するかどうか検討してみた。日データの場合、得られた補正係数は0.76~1.02の範囲となり、(6)式によって得られた計算値に作物係数の推定値を乗じた値は実測値よ

りすべて小さいことを示した。その過小評価の程度は最小0.17mm, 最大2.01mm, 平均1.09mmであった。砂丘裸地は植生地と著しく異なった熱環境を有しており, そのため周囲から蒸発散のための熱エネルギー補給がかなりあると考えられる。本研究に用いた圃場は16m×14mとそれほど大きくないため, ペンマン法による計算値よりもかなり大きな値が得られたものであろう。このように, 文献に示されている回帰係数をそのまま採用するのは無理であるので, ここでは, $x_1 \sim x_4$ の四つの説明変数を取り, その回帰係数を最小二乗法によって決定してみた。この結果, 目的変数 $ET/K_c/ET_p$ に対する重相関係数は日データおよび7日間移動平均値に対して, それぞれ0.93, 0.95となった。ペンマン法による計算値に対する補正係数は, それぞれ0.72~2.01, 1.13~1.68の範囲となった。実測値と蒸発散位の推定値との関係をFig. 7に示す。推定値の標準誤差は, それぞれ0.31mm, 0.14mmとなった。推定精度は, 前に示したような, 直線回帰式を用いた場合に比べて, 7日間移動平均値の場合はほとんど変わらないが, 日データの場合にはかなりよくなる。これは, 7日間移動平均値の場合, 日データの場合に比べて, 移動平均をとることによって説明変数の変化の幅が小さくなるため, 各説明変数の効果も小さくなったものと考えられる。

3. 他の方法による蒸発散位の推定

蒸発散位の推定法は数多く提案されているが, ここでは, ペンマン法に関連する方法として, 次に示す純放射量法と日射量法の二つの方法を取りあげることにした。

$$ET_0 = a \cdot \Delta \cdot R_n / (\Delta + \gamma) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$ET_0 = a \cdot \Delta \cdot R_s / (\Delta + \gamma) + b \quad \dots\dots\dots(9)$$

(8)式の純放射量法は元々 Priestley および Taylor⁹⁾によって提案されたもので, ペンマン法の第二項をゼロとして, 第一項に定数 (オリジナル式の場合1.26) を乗じたものである。日射量法は Makkink³⁾によって提案されたものであり, ペンマン法の第二項を一定としたものに相当する。すなわち, 日射量と純放射量とは次の放射バランス式によって互いに交換できるからである。

$$R_n = (1 - \alpha) R_s - I \quad \dots\dots\dots(10)$$

ここで, α : アルベド, I : 有効長波放射量。

蒸発散位の推定にあたって, (8)式はそのままの形でなく, 直線回帰式, すなわち, $y = a \cdot x + b$ の形で用いることにした。直線回帰式の決定にあたっては, ペンマン法の場合と同様に, 実測値を作物係数の推定値で除した値を独立変数とした。

得られた蒸発散位の推定精度を実測値と推定値の標準誤差として評価すると, 純放射量法の場合, 日データおよび7日間移動平均値に対して, それぞれ0.51mm, 0.11

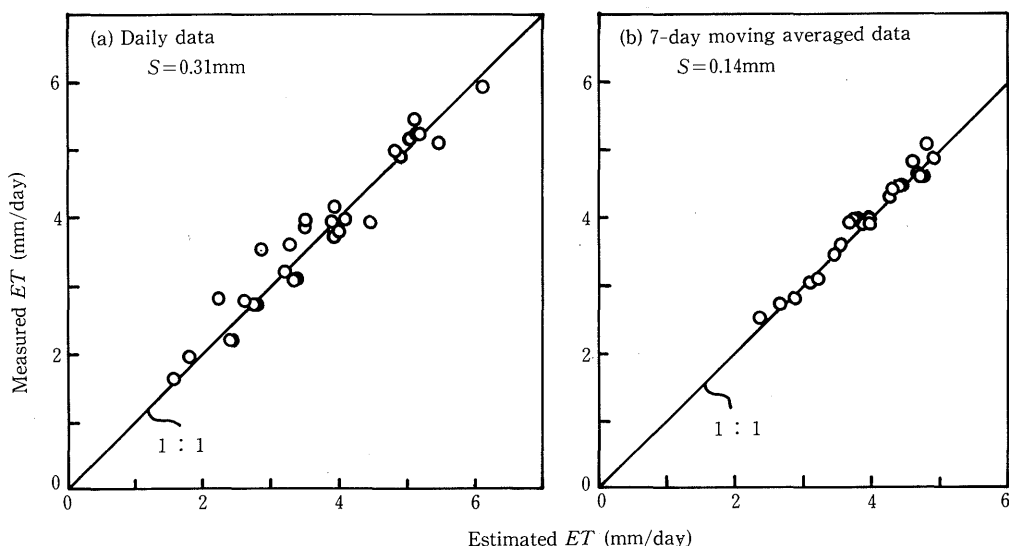


Fig. 7 Relationship between measured ET and estimated ET from ET_p and correction factor determined by multi-regression equation of meteorological factors.

mmになった。また、日射量法の場合、それぞれ0.55mm, 0.13mmになった。ペンマン法の場合には、前に述べたように、それぞれ0.54mm, 0.14mmであったので、精度の面ではほとんど違いはなく、ペンマン法よりも推定精度が良好である場合もある。純放射量法および日射量法はペンマン式の第二項（乱流拡散項）において、風速、湿度の変動の影響がないとした場合に相当し、7日間移動平均値の場合とはかく、日データの場合にはペンマン法よりも推定精度が低下すると予測したが、このような結果が得られたのは注目される。蒸発散位の推定にあたって、風速あるいは湿度のデータが得られなくても比較的によい精度で推定でき、また、対象とする植被面で測定する必要のある純放射量の代わりに日射量を用いることができるのは非常に好都合である。

IV 結 論

ペンマン法を初めとする蒸発散位の推定法の推定精度を向上させる目的で、砂丘地において、グレイソルガムの日蒸発散量を計量型ライシメータによって測定し、次の結果を得た。

1. 日蒸発散量の値は、毎日の天候状態に応じて大きく変動するが、ピーク値は7.1mm/dayであった。
2. 蒸発散の実測値とペンマン法による計算値との相関は弱く、作物の生育状態が蒸発散に大きく影響することを示した。実測値と計器蒸発量との比と葉面積指数との直線関係を利用して、作物係数を葉面積指数の関数として表した。ペンマン法による計算値を直線回帰式で表し、作物係数で補正することによって蒸発散位を比較的

に精度よく推定することができた。この場合、直線回帰式ではなく、気象要素に関する重回帰式からなる補正係数をペンマン法による計算値に乗じたものを用いれば、特に日データの場合には推定精度が向上する。

3. 純放射量法および日射量法による推定値はペンマン法の場合と同じ操作をすれば、ペンマン法の場合とほぼ同様な推定精度が得られる。

なお、本研究は文部省科学研究費（試験研究1・代表者愛媛大学農学部佐藤晃一教授）の援助を受けて遂行したものである。付記して謝意を表する。

引用文献

- 1) Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. : *Crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper, 24. FAO, Rome (1977) pp. 1-54
- 2) Frevert, D. K. et al : Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. *J. Irrigation and Drainage Div., ASCE*, 109, 265-270 (1983)
- 3) Makkink, G. F. : Ekzameno de la formula de Penman. *Neth. J. Agr. Sci.*, 5, 290-305 (1957)
- 4) Penman, H. L. : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 193, 120-145 (1948)
- 5) Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100, 81-92 (1972)