

## 砂丘地における蒸発散について

— 落花生畑の蒸発散量とエネルギーバランス —

矢野友久<sup>\*</sup>・長智男<sup>\*</sup>・林泰弘<sup>\*</sup>

### Evapotranspiration in a Sand Dune Area —Evapotranspiration and energy balance of peanuts field—

Tomohisa YANO \* Tosio CHO \* Yasuhiro HAYASHI \*

*\*Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute,  
Faculty of Agriculture.*

#### Summary

Measurements on evapotranspiration from peanuts by a weighing lysimeter in the Tottori Sand Dunes in 1975 showed the maximum daily value of 9.4 mm/day in August. On days with high evaporativity, considerably more energy was consumed for evapotranspiration than was available from net radiation. A relatively weaker correlation was observed between evapotranspiration and net radiation than between evapotranspiration and class A pan evaporation. Under strong wind, large vapor pressure, and high soil water content conditions, daytime latent heat flux exceeded the difference between the net radiation and the soil heat flux. This was due to the downward flux of sensible heat which was verified by measurements of the air temperature profile. The downward flux of sensible heat in the daytime has often been considered to be evidence of advection, and evapotranspiration in a sand dune area could be seriously influenced by this effect.

#### 1. ま え が き

蒸発散は蒸発の潜熱による熱エネルギーの伝達現象であり、植物体および土壌面に到達した純放射量が、顕熱として大気および土壌に伝達し、また、潜熱として大気に伝達されることによって、植被面付近の微気象環境が形成される。蒸発散の研究においては、植被面のエネルギーバランスを把握することが重要な問題であり、近年、測定技術の向上によって、多くの研究例がみられる。著者らは、この数年

来、砂丘地ほ場に設置したライシメーターにより作物の蒸発散量を測定し、また、純放射量、地中熱伝達量の測定を行ない、砂丘地ほ場におけるエネルギーバランス特性を把握した。さらに、熱収支法（ボーエン比法）、空気力学的方法、組み合わせ法などの微気象的方法により蒸発散量を推定する場合、ほ場内外の微気象環境の相違に由来する移流エネルギーの存在のために、植被面にできるだけ近い高さで微気象測定を行なう必要があることを見出した（6, 7）。ここでは、従来のフローティング型に替わるものと

して、高性能ウェイニング型ライシメーターを用いて、落花生の蒸発散量ならびにエネルギーバランス項を測定し、気象条件および土壌水分条件のエネルギーバランスに及ぼす影響について、若干の検討を行なった。

## 2. 実験方法

蒸発散量の実測は、砂丘利用研究施設内のほ場において、ウェイニングライシメーターを用いて行なった。これは精密な秤であり、まず、土槽（直径2 m、深さ1.5 m）の風袋重量をてこの原理により相殺する。降雨または蒸発により土槽に重量変化が生じた場合の計量さおの変位を検出し、変位から重量変化を知るものである。重量変化は自記記録され、記録計の最小目盛は500 g（水深0.16 mm）である。長期間の連続測定のために、加除おもりによる折返し記録機構を採用した（連続記録幅250 kg）。ライシメーター底部からの排水は、土槽と周辺ほ場の水分条件をできるだけ等しくするために、フィルターを通して負圧をかけて重力水を吸引、排水する構造とした(1)。

供試作物として、半立性落花生（千葉43号）を20 cm×30 cmの間隔で、ライシメーター内だけではなく、周辺効果をなるべく少なくするために、ライシメーターを中心として16 m×20 mに対して植栽した。肥料は10 a 当り、元肥としてCDU燐加安をN：3 kg相当、苦土石灰40 kg、追肥としてCDU燐加安および液肥住友2号をN：12.7 kg相当、苦土石灰40 kgを施用した。播種は昭和50年4月末、収穫は9月末に行なった。

ライシメーターによる蒸発散量の測定は昭和50年6月中旬から9月まで行ない、とくに、7月下旬から8月中旬にかけて、晴天日を対象として13日間の集中観測を行なった。観測時間は7時30分から17時30分までの10時間である。観測内容は、地上1 mに設置した示差輻射計による純放射量、ロビンソン小型風速計による風速（高さ1 m）、アスマン通風乾湿計による乾・湿球温度（高さ30, 40, 50, 70 cm）、測温抵抗体温度計による気温（地表面、30, 40, 50, 70, 100 cm）および地温（深さ2.5, 5, 10, 20, 30, 40 cm）、テンシオメーターによる土壌水分吸引圧（深さ5, 10, 20, 40 cm）である。観測は1時間ごとに行ない、蒸発散量、純放射量および風速は1時間あ

たりの値を自記紙から読みとった。集中観測時の生育状態は、高さ約15 cm、葉面積指数3.3であった。かん水については、砂丘地における慣行かん水量、3日間断20 mmを標準とし、天候条件、季節に応じて加減し、夕方に行なった。

## 3. 実験結果と考察

### (1) 日蒸発散量の季節的变化

まず、全期間に対する日蒸発散量の変化を図一1に示す。ここで、降雨日においては、雨量計の精度が0.5 mmであり、蒸発散量の測定精度が無降雨日に比べて著しく低下するので、プロットから除外した。蒸発散のピークは7月末から8月初めにかけて生じており、8月1日には最大値9.4 mm/dayを示した。この時期は、太平洋高気圧の勢力が強く、晴天に加えて強い南風（陸風）の日が続き、湿度も低く、蒸発をうながす気象条件にあったために、非常に大きな蒸発散量を示したものである。一方、8月下旬には、一時的に肥料が欠乏したためか、生育状態が悪化し、きわめて小さい蒸発散量を示した（図一2および図一3参照）

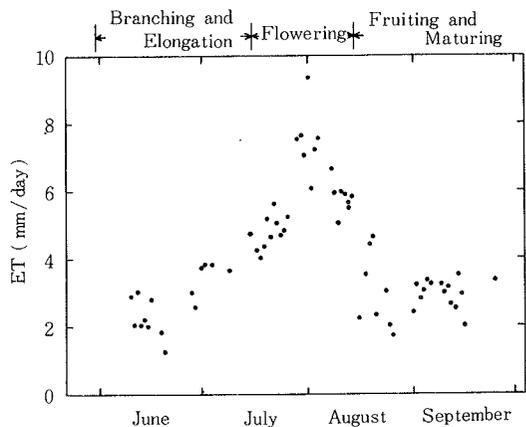


Fig. 1. Seasonal variations of daily evapotranspiration from peanuts in the Tottori Sand Dunes, 1975.

つぎに、7、8月における日蒸発散量と純放射量および大型蒸発計蒸発量（直径1.2 m）との関係を図一2および図一3に示す。ここで、純放射量は蒸発の潜熱（585 cal/g, 20°C）で除して蒸発当量（mm/day）で示した。また、図においてかん水直前、7月上旬および8月下旬の値についてはそれぞれ区別を行なった。7月上旬は、まだ十分な生育状態が得られて

いなかったために、比較的小さい蒸発散量を呈している。一般に、純放射量は、単独の気象要素としてもっとも蒸発散量との相関が強いと言われているが、ここでは相関係数 0.55 (8月下旬の4日間については計算から除外した) で、比較的弱い相関を示している。これは、純放射量以外の気象要素の蒸発散量への影響が強いことを意味する。土壌水分の影響については、かん水直前の日の値は、もし土壌水分が充分多ければ、全体的に増加すべきものであろう。蒸発散に使われたエネルギーが純放射量より大きな日がかかなりの割合を占めるのは注目すべきである。一日を単位とした場合、土壌への貯熱量はほぼ零とみなしてよく、純放射量以上の蒸発散に必要な熱エネルギーの不足分は大气から補給されると言える。このことについては、後で再度触れる。一方、計器蒸発量は、蒸発現象に対する各気象要素の総合的な効果の指標とも考えられ、その蒸発散に対する相関は非常に高いと言われている。ここでは相関係数 0.78 となり、純放射量に比べてかなり相関は高い。土壌水分の不足が蒸発散に及ぼす影響はかなり現われており、両者の関係のばらつきを増している。生育状態の影響については、7月上旬、8月下旬ともに著しく現われており、このような一年生作物に対して、全生育期間にわたって、同一の関係式で近似させることは無理である。別の測定によれば、比較

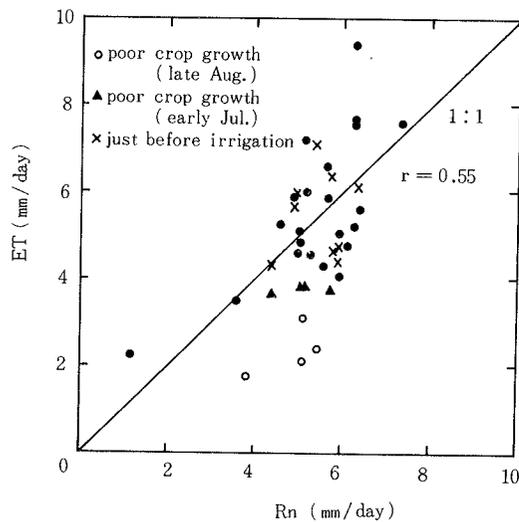


Fig. 2. Relation between daily evapotranspiration (ET) and net radiation (Rn) in July and August, 1975.

的に高い土壌水分を保った状態における永年性牧草の蒸発散量と計器蒸発量との関係は、通年に対しても相関係数 0.9以上の非常に強い相関を示し、生育状態の影響はあまり現われていない(8)。

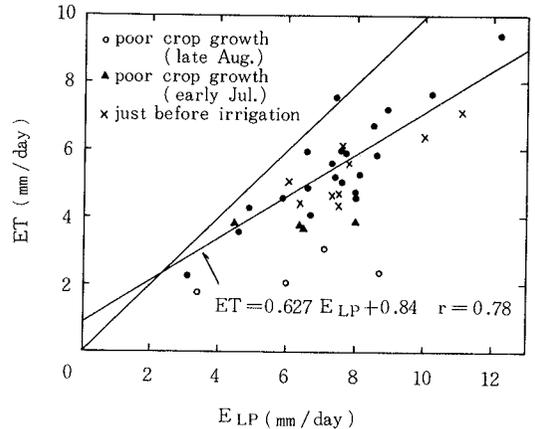


Fig. 3. Relation between daily evapotranspiration (ET) and class A pan evaporation ( $E_{LP}$ ) in July and August, 1975.

## (2) 植被面のエネルギーバランス

植被面のエネルギー収支式は  $R_n = S + A + LE + P$  で表わされる。ここで、 $R_n$ : 純放射量、 $S$ : 地中熱伝達量、 $A$ : 顕熱伝達量、 $LE$ : 潜熱伝達量、 $P$ : 光合成などに使用される熱エネルギーであり、他の項に比べて小さく、通常は無視される。地中熱伝達量は地中熱流板などによって直接測定できるが、ここでは地温変化、土壌水分を測定することによって温度積分法により求めた。潜熱伝達量は蒸発散量の実測値に蒸発の潜熱を乗じて算定し、顕熱伝達量はエネルギー収支式の残差項として求めた。上記のエネルギー収支式はフラックスが鉛直方向であることを仮定しており、水平方向の熱エネルギーの流れがある場合には適用に注意が必要である。すなわち、ライシメーターなどで蒸発散量を実測した場合は、地表面でのエネルギーバランスをとったことになり、垂直収支式で充分であるが、ボーエン比法などで蒸発散量を算定した場合は、水平方向フラックスを無視することによる誤差が考えられる。

7月下旬から8月中旬にかけて行なった集中観測の結果を表-1に示す。ここで、気温 ( $T$ ) は地上 1 m、飽差 ( $d$ ) は地上 70 cm の値である。土壌水分吸引圧 ( $M$ ) は、主根群が深さ 10 cm までに集中して

いることから、深さ5cmにおけるものを採用した。全体的な傾向として、純放射量の変動に比べて、潜熱伝達量の変動が大きい。地中熱伝達量は初めの3日がやや大きく、その他の日はほとんど変化がない。これは、集中観測時の初期において、作物の表面被覆の程度が相対的に低く、裸地面の露出度が高く、したがって、土壌の貯熱量が大きくなると考えられる。土壌水分の多少による地中熱伝達量の相違は顕著には現われていない。純放射量以外の気象要素としては、風速の蒸発散量に対する影響が強い。とく

の 패턴の違いが著しい。これは、土壌水分の多少によるエネルギー配分の違いを示すもので、顕熱伝達量は、土壌水分が十分に多い場合、正午まで大体零に近いのに対し、土壌水分が不足している場合、11時には正のかなり大きい値を示している。地中熱伝達量は、土壌水分が不足している場合、午前中に貯熱量が大きいことを示す。図-4(3)および(4)は、風速が大きく、大気が乾燥し、蒸発能が高い条件の場合である。図-4(3)は土壌水分が不足している場合で、顕熱伝達量は正午から正の値

Table 1. Measured evapotranspiration and weather conditions for 10-hour periods (0730-1730) during summer, 1975.

Date	ET (mm)	LE (ly)	Rn (ly)	S (ly)	A (ly)	T (°C)	d (mb)	u (m/sec)	M (cmH <sub>2</sub> O)	
July	22	5.19	300.7	425.5	68.8	56.0	29.3	11.3	1.6	18
	23	4.58	264.9	375.8	67.0	43.9	30.9	15.0	1.5	71
	24	4.11	237.6	388.3	68.4	82.3	31.2	13.1	1.6	268
	29	6.53	376.4	429.5	55.4	-2.3	34.4	27.2	3.5	245
	30	7.16	413.1	392.2	50.8	-71.7	33.3	23.7	3.8	43
	31	6.11	357.1	359.4	44.7	-42.4	33.7	24.5	3.8	212
August	5	5.32	306.7	380.8	46.1	28.0	33.8	22.0	2.9	277
	8	6.21	366.4	403.0	45.6	-9.0	27.1	12.8	2.6	27
	9	5.47	317.8	338.5	44.6	-23.9	26.3	13.7	3.2	45
	12	4.87	280.7	325.3	45.2	-0.6	30.2	11.3	2.6	38
	13	4.62	267.1	343.2	46.3	29.8	31.1	17.9	2.6	119
	14	5.16	298.6	392.0	53.2	40.2	30.4	15.1	2.8	24
	15	4.49	259.9	369.9	53.6	56.4	30.2	12.7	2.0	47

Symbols are as follows : ET = measured evapotranspiration; LE = latent heat flux; Rn = net radiation; S = soil heat flux; A = sensible heat flux; T = average air temperature; d = vapor pressure deficit; u = wind speed; M = average soil water potential

Note : leaf area index 3.3

に、7月末から8月初めにかけて南風が卓越した時期においては、陸風であったために飽差が大きく、きわめて乾燥した気象条件であったので、大きな蒸発散量を示している。また、7月22日と8月8日の例が示すように、同様な飽差であっても、風速が大きければ蒸発散量がかなり大きくなることが明らかである。土壌水分の不足による蒸発散量の抑制については、程度の差はあるが、きわめてよく現われている。

つぎに、上記の13日間の中で、7月22日、24日、29日、30日の4日間について、エネルギーバランス項の時間変化を図-4(1)~(4)に示す。これは、蒸発能が高い条件と低い条件で、それぞれ、土壌水分が十分に多い日と不足している日の例である。まず、図-4(1)と(2)は蒸発能がそれ程高くない条件の場合である。顕熱伝達量と地中熱伝達量

に転じており、図-4(2)と似た傾向を示す。しかし、蒸発能が高い条件にあったために、午前中の潜熱伝達量が大きく、顕熱伝達量はわずかながらではあるが、10時間総計で負の値をとっている。図-4(4)は、土壌水分の不足がない場合で、潜熱伝達量は非常に大きく、純放射量にほぼ等しいか、それより大きな値を示している。したがって、顕熱伝達量は常に負の値をとっている。

一般に、気温プロファイルは夜間に逆転状態、日中に低減状態をとるのが通常であり、日中に逆転状態が存在する場合、熱または水蒸気の移流によるものとしている文献が多く、しばしば「advective heating」と呼ばれている<sup>(5)</sup>。移流は対象とする地域とその周囲の表面特性(色、粗さ、水分など)の違いによる温・湿度の水平こう配により生じる。たとえば、乾燥地のかんがいされたほ場の周囲に休閑地などが存

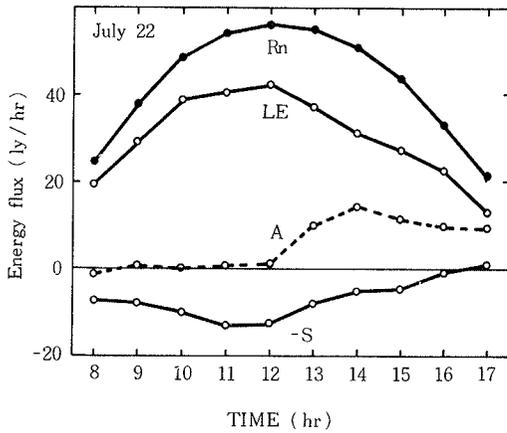


Fig. 4. (1)

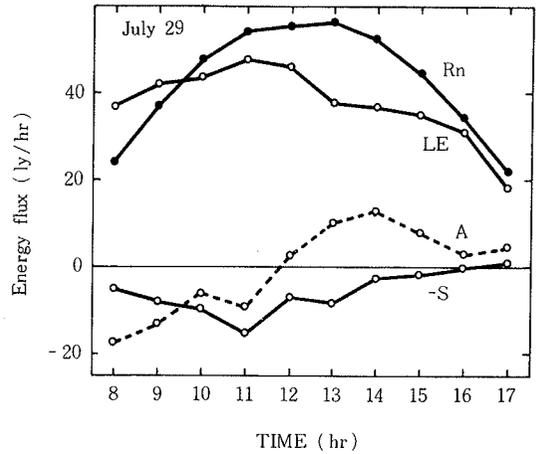


Fig. 4. (3)

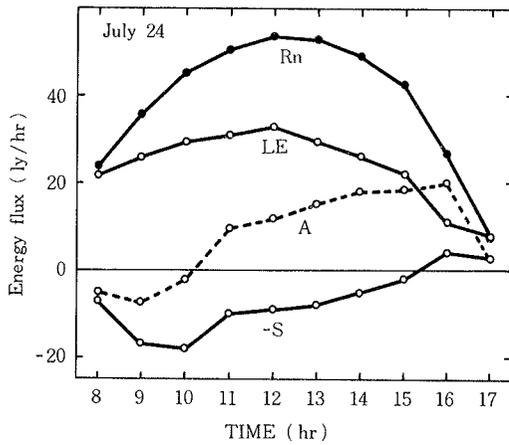


Fig. 4. (2)

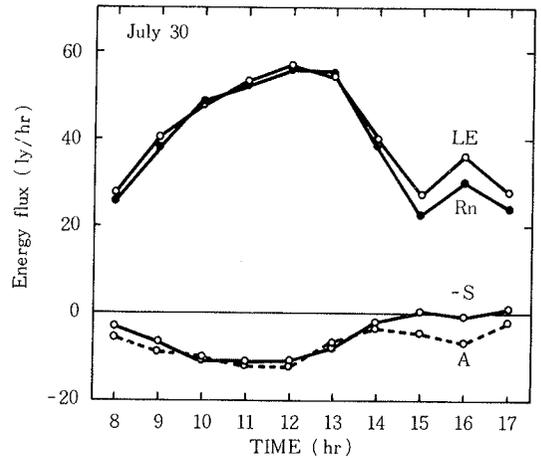


Fig. 4. (4)

Fig. 4(1)~(4). Hourly variations of energy flux on July 22, 24, 29 and 30, 1975

在する場合、相対的に高温で乾燥した周囲の空気がほ場の上を通過する際に、植被面付近で蒸発による湿度の増大および温度の低下による温・湿度分布の変化を生じる。この結果、植被面付近の温度逆転、すなわち下向きの顕熱伝達量をもたらし、潜熱伝達量に対するエネルギーの付加的補給源となり、したがって、大きな蒸発散量を示すことになる。前記4日間の気温プロファイルを図-5に示す。地面直上から30cmまでの気温を細かく測定していないので、厳密なプロファイルとは言えないが、7月30日における高さ30cm付近での温度逆転状態、早朝の温度逆転から低減状態への変化、土壌水分の多少によるプロファイルの違いがよく現われている。

移流による温・湿度分布の変化ならびにほ場の規模の違いによる蒸発散量の変化については、乾燥地域において主として行なわれており、測定点とほ場の風上端における温・湿度差の90%が調整、確立されるに必要な吹送距離(フェッチ)は、一般に、測定高の100倍と言われている(3)。また、移流による蒸発散量の変化については、まだ定説は得られていない現状であり、同じほ場での測定においてすら、150mのフェッチの地点で、ある場合はわずか4%、他の場合には40%の蒸発散量の変動があったことが報告されている(7)。本実験で使用したほ場は北風に対して10m、南風に対して30mのフェッチしかなく、かなりの移流の存在が予想されるが、砂丘地のため

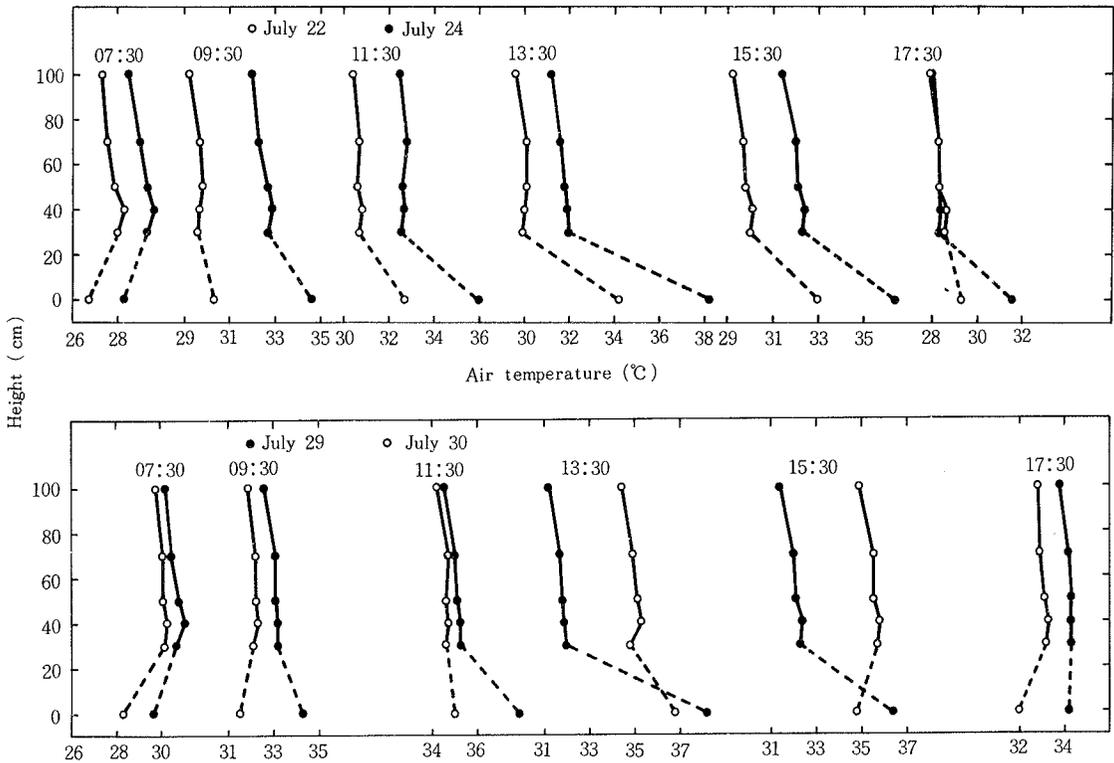


Fig. 5. Variations of air temperature profile on July 22, 24, 29, 30, 1975.

に地形的にも複雑であり、かんがいされたほ場と周囲の裸地という違いだけでなく、風速ならびに風向の蒸発散に対する影響が平坦地における場合と異なることも考えられる。このように、本実験の場合、温・湿度の水平こう配を測定して移流エネルギーを把握することはきわめて困難である。

前記のように、大気から植被面への顕熱伝達量は移流によるという主張に対して、潜熱伝達量が純放射量より大きい場合でも、温・湿度の水平こう配がない例や、逆に、純放射量が潜熱伝達量を大幅に上回る場合でも、風下方向に温・湿度のこう配が存在した例が報告されており<sup>(4)</sup>、移流の存在の有無は、エネルギーフラックスの水平方向成分の測定によって決められるべきものであろう。とくに、地域の気候特性の指標として、あるいはかんがい排水計画におけるかんがい用水量の算定などに広く利用される蒸発散位は広い耕地からの蒸発散量、すなわち、厳密には移流エネルギーがない状態を前提としており、移流の蒸発散量に及ぼす影響の解明は重要であり、今後に残された課題である。

#### 4. 結 論

砂丘地において、落花生の蒸発散量を3ヶ月間にわたりウェイングライシメーターで測定した。さらに、7月下旬から8月中旬において、微気象観測を行なって、植被面のエネルギーバランス項の測定を行ない、つぎの結果を得た。

1. 落花生の日蒸発散量のピーク値は9.4mm/dayで、蒸発散のためのエネルギー源としての純放射量を上回る熱エネルギーを消費した日が約半数を占めた。蒸発散量と純放射量および計器蒸発量との相関係数は、それぞれ、0.55および0.78であり、純放射量以外の気象要素の蒸発散量に対する影響が強いことを示した。

2. 風速ならびに飽差の大きい条件のもとで、土壌水分に不足がない場合、潜熱伝達量は純放射量から地中熱伝達量を差し引いたものより大きい値を示し、大気から植被面に向かう顕熱伝達量をもたらした。土壌水分が不足している場合、顕熱伝達量は午前中に下向きから上向きに変わり、蒸発散に対する

抑制要因となった。

3. 日中における大気から植被面に向かう顕熱伝達量は、ほ場と周辺裸地との微気象環境の違いに由来する熱あるいは水蒸気の移流によるものと言われ、砂丘地における蒸発散の特徴的なものと考えられる。

本研究にあたっては、専攻生田野嘉美君の多大なる協力を得た。厚く感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

1. 長 智男・矢野友久, 1974, 農業土木学会誌, 42, 359-362
2. DYER, A. J. and T. V. CRAWFORD, 1965, Quart. J. R. Meteorol. Soc., 91, 345-348.
3. DYER, A. J., 1963, Quart. J. R. Meteorol. Soc., 89, 276-280.
4. PRUITT, W. O., 1964, Trans. Amer. Soc. Agr. Eng., 7, 271-275.
5. TANNER, C. B. and W. L. PELTON, 1960, J. Geoph. Res., 65, 3391-3413.
6. 矢野友久・塩見文明・長 智男, 1974, 鳥取大農研報, 26, 100-106.
7. 矢野友久・高塚孝教・長 智男, 1973, 鳥取大農研報, 25, 109-117.
8. 矢野友久, 1975, 土壌の物理性, 32, 24-28.

