

裸地ライシメータにおける水・熱収支

Experimental Study on Water and Heat Balance
at Bare Soils in Lysimeters

大坪 国順*

By Kuninori OTSUBO

Water balance in lysimeters with bare surface was studied under the condition of artificially controlled room temperature and humidity and soil temperature. Evaporation was found to dominate the water balance there. The evaporation was investigated by the use of an "evaporation" pan and from a viewpoint of heat balance. The reasonable evaporation rates were evaluated by the heat balance method. The evaporation process in the lysimeters was categorized as the constant-rate stage for each experimental condition. The sensible heat flux was found to almost always enhance evaporation in this series of experiment.

Keywords: water balance, heat balance, lysimeter, evaporation

1. まえがき

半乾燥域での砂漠化問題に対処するにあたって水資源の観点から見た環境容量の概念が重要となる。その算定にはその地域の水循環の把握が不可欠である。人為的原因もしくは気候変動に伴う水循環の長期変動の予測には、水循環に及ぼす環境諸因子の影響評価が大前提である。しかし、現状では水循環系の複雑さのためその評価はほとんどなされていない。本研究の目的は、大型ライシメータを用いた実験により土壌-大気系での水循環メカニズムの理解を深めることである。一部の環境影響因子を人工的に制御して、特定の因子を変化させ、その因子の水収支への影響評価や、水収支に関する支配的因子の同定を試みた。実験結果から蒸発量が支配的因子と推察され、それを検証すべく蒸発特性に関する実験・解析を行なった。

2. 実験および解析方法

2・1 水収支に関するライシメータ実験

制御した環境因子は、温室内の気温、湿度と土壌温度である。設定値は気温が日中25℃、夜間20℃、湿度

* 正会員 工博 国立環境研究所主任研究員 水士圏環境部
(〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

が60%、土壌温度が20℃であるが、実際の温室内の湿度は夜間が70%前後、日中は50~65%であった。日中は温度、湿度とも変動が大きい。変化させた因子は散水量と地下水位である。共に淡色黒ぼく土が充填された直径1.7m、高さ2.3mの2基のライシメータ（以後Lysi. #2, Lysi. #4と呼び、添字2, 4はそれぞれLysi. #2及びLysi. #4での値を意味する。）を裸地の条件で用いた。散水は毎週月曜の定時に行なった。Lysi. #2では散水量はほぼ同じ条件で地下水位（-230cmと-105cm）の影響を検討し、Lysi. #4では散水量（65, 130, 及び32.5 l/week、mm 換算ではそれぞれ2.86、5.76及び1.43）の影響を検討した。Lysi. #4ではLysi. #2に比べて遮光の影響が大きい。表層の状態はLysi. #4の方が団粒の発達が悪く、空隙率が小さくて貫入抵抗が大きい。Lysi. #2と#4の表土の空隙率はそれぞれ約75%と72%であり、1週間の平均飽和度はそれぞれ約77%と86%とむしろLysi. #4の方が高い。解析に用いた週間蒸発量は散水量 Q_r と浸透量 Q_p から逆算した。厳密には蒸発量はライシメータ中の水分総量の変化の影響を受けるが、同一実験条件下での浸透パターンは安定で水分総量の変動は少なく、水収支の長期変動を見る目的には今回の算定法で十分と考える。

2.2 蒸発特性に関する実験

(a) 小型蒸発ポット

断面積100cm²、高さ7cmの茶筒型ポットを蒸発計とした。水を張ったポット(Pot2, Pot4)をそれぞれ電子天秤に載せ、Lysi. #2およびLysi. #4の上に設置し、ポット重量の変化を自動計測させた。また、ポットに黒ぼく土を詰め、毎週1回水を加えた蒸発実験も行なった。さらに、ポットの設置位置の影響を見る実験も行なった。Lysi. #2の上には日射計も設置した。構造物による遮光の影響で、日射量 R については $R_2 \gg R_4$ となっている。

(b) 熱収支パラメータの測定

日射量はA型簡易型日射計（英弘精機、MS-2）により計測した。土中伝導熱量（MJ/m²/h）はライシメータ内の深さの異なる12地点での土壌温度変化から計算した¹⁾。潜熱・顕熱fluxに関するパラメータとして、土壌表面上5mmと0.2m、さらに地上1.5mの位置での気温と湿度を計測した。熱収支計算に用いたパラメータは全てハイブリッド記録計（横河電機、HR2300）により自動記録させた。

3. 実験、解析結果およびその考察

3.1 水収支パラメータの長期的変動特性

図-1および図-2はLysi. #2およびLysi. #4における各深さ（10cmより深い層）のサクシジョンの週間最高値の長期的変動である。Lysi. #2では地下水位の上昇によりサクシジョンが下がり、土壌がより湿潤な状態に移行したことがわかる。また、Lysi. #4の結果から散水量が多い程土壌が湿潤な状態になることがわかる。

図-3及び図-4は週間浸透量、週間蒸発量、週間日射量の長期変動結果である。ここで用いられている日射量は屋外で計測されたもので、各ライシメータが受ける正味の日射量はこれよりかなり小さい。Lysi. #2の浸透量は日射量の季節変動と位相が逆転する傾向が見られる。一方、Lysi. #4では、浸透量は日射量の季

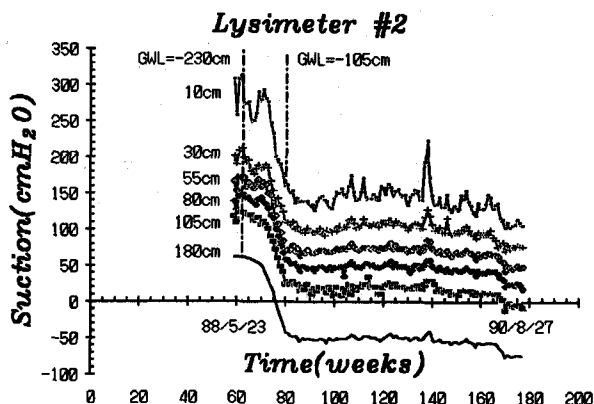


図-1 サクシジョンの最高値の長期的変動 (Lysi. #2)

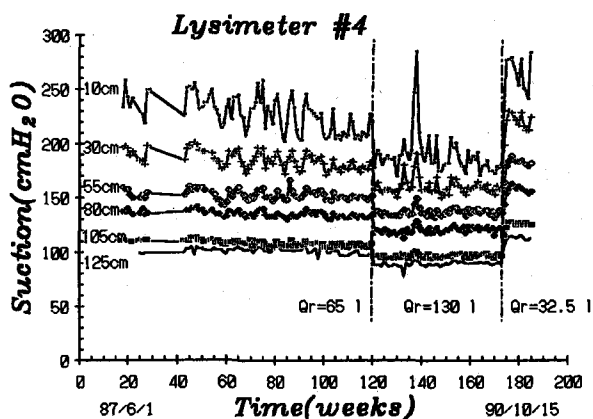


図-2 サクシジョンの最高値の長期的変動 (Lysi. #4)

節変動に関係なく、散水量に応じて増減している。注目すべき結果は蒸発量についてである。Lysi. #2では、日射量と同じ季節変動を示すものの、地下水位の上昇の影響をほとんど受けていない。また、Lysi. #4においても、蒸発量は散水量の影響を受けていない。

図-5は各実験条件での週間日射量と週間蒸発量との関係である。図中の実線は各条件での蒸発量の日射量に対する回帰直線である。図-5から以下ことが言える。同じライシメータでは、蒸発量と日射量の関係は散水条件、地下水位に関係なくほぼ一定である。蒸発量はLysi. #2の方が多く、日射量に対する増加勾配も高い。両ライシメータ表層部の土壌構造と正味の日射量の違いが原因と考えられる。

土壌表面温度の1週間の最大値、最小値、平均値、標準偏差の長期変動も検討した。最大値と平均値に日射量の季節変動に同期する傾向が認められたものの、散水量の変化の影響はほとんど認められなかった^{2,3)}。同様に、地下水位の変化による土壌表面温度への影響もほとんど認められなかった。

表-1は、Lysi. #4の表層(3cm層)での毎日9:30a.m.における体積水分率 θ である。日を追う毎に水分率は低下するが、低下率も小さくなる。散水条件が4倍異なるにも関わらず、両条件で水分率は散水日を除きほぼ同じである。図-1のサクション ψ の有意の差と比べると、対象的であるが、 $\theta \approx \psi^{-b}$ のべき数 b の値がLysi. #2では6から7、Lysi. #4では10以上と大きい(大坪:未発表)、 θ の変化としては非常に小さくなる。厳密には、土壌内の水分率は、散水量の減少により低下し、地下水の上昇により増加したと考えられる。水分率の低下につれて透水係数は低下するが、各深さでの吸引圧勾配が増大し、蒸発速度をほぼ一定に保っていると考えられる。

図-6は各条件での散水直前での吸引圧勾配

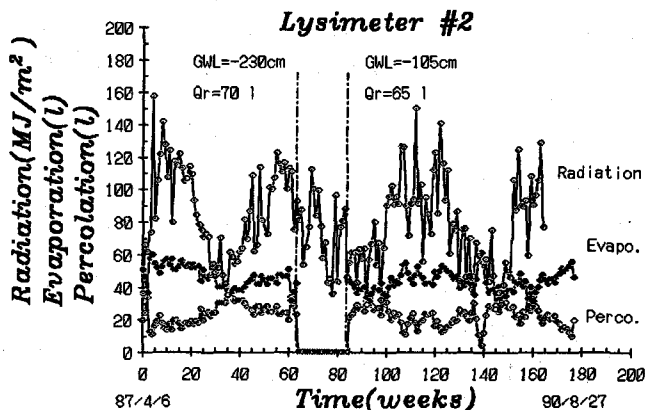


図-3 1週間の浸透量、蒸発量、日射量の変動 (Lysi. #2)

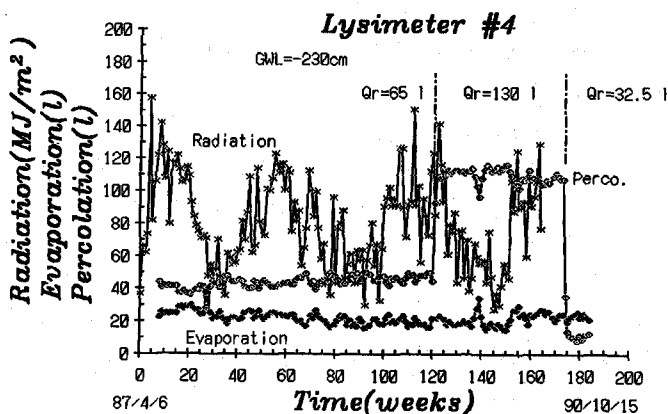


図-4 1週間の浸透量、蒸発量、日射量の変動 (Lysi. #4)

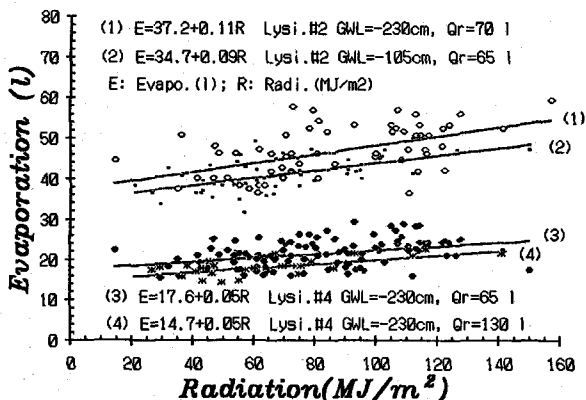


図-5 蒸発量と日射量との関係

表-1 表層土壌の体積水分率の日変化

Qr(1)	VOLUMETRIC MOISTURE CONTENT θ						
	MON.*	TUE.	WED.	THU.	FRI.	SAT.	SUN.
130	0.713	0.684	0.665	0.651	0.643	0.640	0.635
32.5	0.700	0.660	0.643	0.639	0.635	0.636	0.631

MON* : Just after water application of Qr;
MON** : Just before water application of Qr.

である。散水量が少ないほど、また、地下水位が低いほど、特に浅い層で吸引勾配が大きいことがわかる。

3・2 水収支に関する考察

気温、湿度、土壌温度が制御された環境下での裸地ライシメータでの水収支の特性は次のように要約される。

- 1) 水収支は蒸発量に支配される。
- 2) 蒸発量は散水量や地下水位条件にほとんど影響されない。
- 3) 表層の水分量は土壌構造（間隙比、団粒度）には依存するが、内部の水分状態や地下水位にはほとんど影響されない。
- 4) 蒸発現象は表層での土壌の状態量と外的条件（気温、湿度、日射量）に支配されると考えると、今回の結果が説明できる。
- 5) 今回の環境下では、表層の土壌の状態に変化を及ぼす因子は土壌構造と日射量のみである。

3・4 蒸発特性

(a) 蒸発ポットにおける蒸発特性

図-7は蒸発ポットでの蒸発速度 e_p (mm/h)と日射量の瞬間値 r (kW/m²)の時間変化である⁴⁾。蒸発速度、日射のない夜間では $e_{p2} = e_{p4}$ となり、昼間は $e_{p2} > e_{p4}$ となった。夜間のポットでの蒸発速度は平均約 0.1mm/hで1週間を通じてほぼ一定である。黒ぼく土をポットに詰めた場合の蒸発特性は土壌表面が乾燥するまでは、水ポットの場合とほとんど同じとなった。即ち、夜間の e_p の値は#2と#4で差がなく、やや朝方に向い減少傾向にあった。日中の e_p は r との相関が高く、やはり $e_{p2} > e_{p4}$ となった。

図-8は#2での、日中(5:30a.m. ~ 6:30p.m.)の蒸発量 E_d (mm)と日射量 R_d (MJ/m²/d)の関係である。

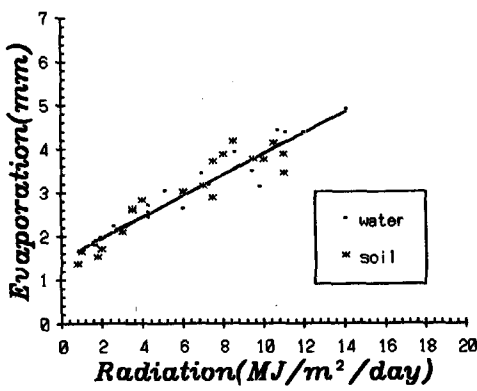


図-8 日中の日射量と蒸発量の関係

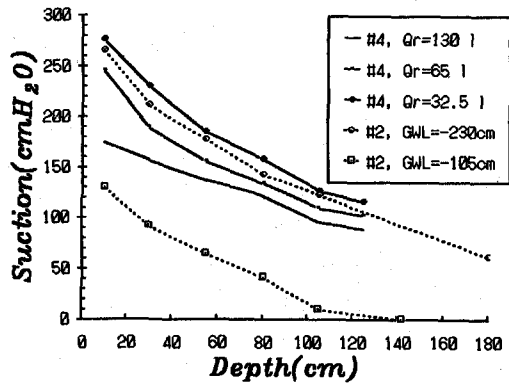


図-6 散水直前のサクシンの鉛直分布

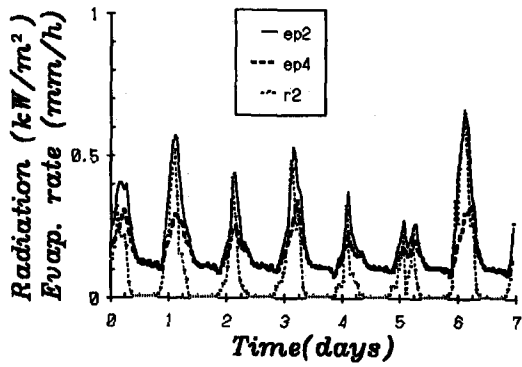


図-7 蒸発速度と日射強度の時間変化

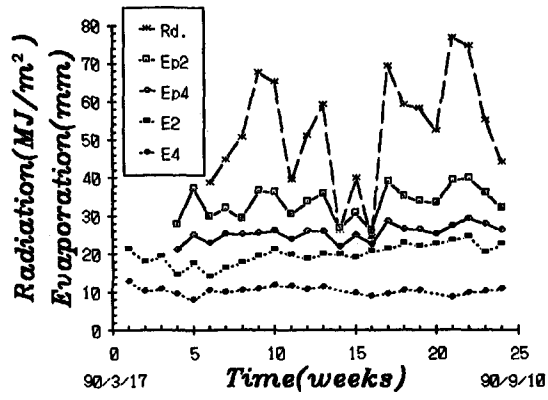


図-9 週間蒸発量の比較

その関係は水ポットと黒ぼく土ポットでほとんど差がないことがわかる。土壌表面が乾燥した後は黒ぼく土ポットの蒸発速度は急激に減少した（減率蒸発段階）。

図-9は水ポットの1週間蒸発量 E_p (mm)とライシメータのそれとを比較したものである。 E_{p2} 、 E_{p4} はポット蒸発量であり、 E_2 、 E_4 はライシメータの蒸発量である。 E_2 、 E_4 は図-3、4の蒸発量をmmに換算したものである。ポットの設置位置の影響はLysi.#2ではほとんどなく、Lysi.#4では30%程度であった。 E_{p4} は蒸発量が最大となる設置位置で測定したものである。 $E_{p2} > E_{p4} > E_{p1} > E_2 > E_4$ なる結果となった。ここで、 E_{p1} は夜間におけるポット蒸発速度から算定した週間蒸発量で、ライシメータでの蒸発量は日射がないとした場合のポット蒸発量より少ない結果となった。1週間日射量 R (MJ/m²)と E_{p2} 、 E_{p4} との対応は非常に良いが、 E_2 、 E_4 との対応はそれほどでもない。

(b) 熱収支法による蒸発特性の解析結果

裸地ライシメータでのエネルギー（熱）収支は次のように表わされる。

$$J_n = LE + A + S \tag{1}$$

ここで、 J_n は純放射量、 LE は潜熱flux、 A は顕熱flux、 S は土中伝導熱量である。ボーエン比 β を用いると、潜熱、顕熱fluxは次のようになる。

$$LE = (J_n - S)/(1 + \beta) \tag{2}$$

$$A = \beta (J_n - S)/(1 + \beta) \tag{3}$$

今回の解析では、 J_n 、 S および β を測定もしくは評価することによって、 LE を算定し裸地ライシメータにおける蒸発量を推定した⁵⁾。

図-10は、各ライシメータ地表部（表面から5mm上）と地上部（地上1.5m）での温度の時間変化である。地上0.2mの温度は地上1.5mでの温度とほぼ同じである。夜間には地表部での温度が常に低い。日中も地表部での温度が低いことが多い。図-7で夜間の蒸発速度が明け方に向けて減少するのは、その時間帯に地表部温度が低下するためと考えられる。湿度については、夜間は地上部（地上0.2m、1.5m）では70%前後、地表部では73~75%ではほぼ一定であり、日中は50~65%の間で激しく変動するが地表部のほうが高い。日射が強い日ほど湿度も下がり変動も激しく、地表部と地上部とで差がないこともある。しかし、水蒸気圧は常に地表部の方が高い。以上の結果から、顕熱fluxは昼夜を通して大気から土壌へ方向となることが伺われる。

図-11は土中伝導熱量の時間変化の一例である。Lysi.#2とLysi.#4でほとんど違いがない。土中温度変動の振幅はLysi.#2の方が大きい、水分率が少ないため比熱が小さくなり heat fluxとしては両ライシメータで差がない結果となった。表-2は晴天が

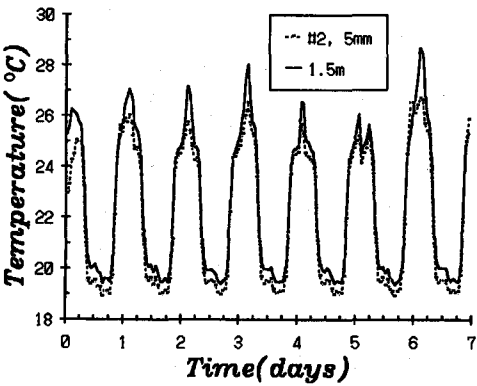


図-10 地表部温度の時間変化

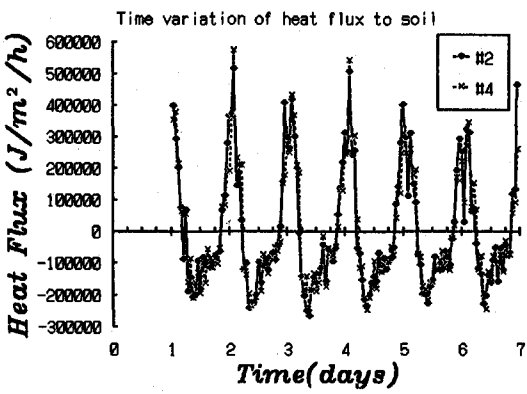


図-11 土中伝導熱量の時間変化

表-2 週間土中伝導熱量の解析例

Date	Radiation (MJ/m ² /w)	Heat Flux in Soil (MJ/m ² /w)			
		Daytime		Night	
		Lysi.#2	Lysi.#4	Lysi.#2	Lysi.#4
90/5/28	65.06	6.45	5.37	-7.72	-5.87
90/8/20	74.47	8.12	8.27	-8.57	-8.66
90/9/24	22.70	4.25	4.97	-5.66	-5.82
90/10/29	37.00	5.83	5.65	-5.58	-6.87

続いた週と曇天日が続いた週の日中と夜間の週間土中伝導熱量の計算例である。どの週も Lysi. #2と Lysi. #4でほとんど違いがない。日中と夜間ではfluxの方向は逆転するが値は若干夜間が多い程度である。日中の土中伝導熱量は日射量の1、2割程度であることが分かる。

表-3は表-2で解析対象にした週における日中と夜間のボーエン比の1週間の平均値である。曇天日が続いた週の日中は、曇天日と晴天日を分けて計算した。特徴的なことは、 β の値が負のケースが多いことである。 β の値が正となったのはわずかに10月29日の週の晴天日の日中のみである。曇天日の日中と夜間には、 β は-0.45前後の値となることが多い。 β の結果から、温室空気からの熱がライシメータ土壤に伝わり、蒸発潜熱として使われていることが分かる。

表-4は熱収支法により算定したライシメータ週間蒸発量の結果である。日中(5:30a.m. - 6:30p.m.)と夜間に分けて算定した。Lysi. #4での日射量が測定していないので、Lysi. #4については夜間蒸発量のみ算定した。算定にあたり、以下の仮定、補正を行なった。純放射は日射量の0.7とした。また、夜間の純放射は気温と土壤温度の差が小さく、前者が高いこともあり無視した。火曜から日曜までのデータを用いて計算し、7日分に補正した。算定されたLysi. #2での蒸発量 E_1 は実際の蒸発量 $E_2(=Q_r-Q_0)$ とよく対応している。表-4の結果から夜間についてはLysi. #2と#4で蒸発量はあまり差がないこと、さらに、気温、湿度および土中伝導熱量の変動パターンから夜間の蒸発速度は1週間を通じてほぼ一定であると考

表-3 ボーエン比の評価値

Date	Averaged BOWEN Ratios					
	Lysimeter #2			Lysimeter #4		
	Daytime		Night	Daytime		Night
	fine	cloudy		fine	cloudy	
90/5/28	-0.175		-0.172	-0.149		-0.145
90/8/20	-0.129		-0.295	-0.448		-0.251
90/9/24	-0.016	-0.447	-0.414	-0.019	-0.430	-0.483
90/10/29	0.196	-0.372	-0.468	0.412	-0.524	-0.468

表-4 熱収支法による蒸発量推定値

Date	Weekly Evaporation					
	Lysimeter #2			Lysimeter #4		
	Qr-Qp	Et	Ed	En	Qr-Qp	En
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
90/5/28	20.87	23.18	19.38	3.79	11.68	3.23
90/8/20	24.43	26.44	21.50	4.94	9.62	4.72
90/9/24	14.05	10.73	7.10	3.63	10.53	4.58
90/10/29	14.22	12.98	8.72	4.26	9.91	4.49

Qr: Applied water; Qp: Percolated water;

Et: Estimated Evaporation Amount in mm given by $E_d + E_n$;

Ed: Estimated evaporation amount in daytime, in which an effective radiation was assumed to be 0.7 of Radiation; and

En: Estimated evaporation amount at night.

えられることなどから、ライシメータでの蒸発速度は、外的条件による蒸発要求量(大気蒸発力)により決定されていると考えられる(恒率蒸発過程)⁶⁾。表層含水比が75%前後以下では、土壌面蒸発量は土壌水分と外的条件により決定され蒸発要求量よりかなり小さくなる(減衰蒸発過程)と言われている⁷⁾。ライシメータの表層の平均含水比は#2で60%、#4で67%前後と75%より低い、先に述べた理由で、ライシメータの蒸発はどの実験条件下でも恒率蒸発段階と考えられる。

3・4 蒸発特性に関する考察

ポット、ライシメータ共、夜間の蒸発速度に場所的な差があまりないので、 $E_{02} > E_{04}$ 及び $E_2 > E_4$ なる結果は、昼間の蒸発速度の違いを反映し、その原因は日射量の違いにあると考えられる。日射強度 r は $r_2 \gg r_4$ と考えられるにも関わらず、両ライシメータの土壤温度上昇(土中伝導熱量)には大差がない。これは、日射量の差の大部分は蒸発潜熱に反映されたためと考えられる。

$E_0 \gg E$ なる理由は以下のように考えられる。水ポット蒸発量は E_0 はその場所での蒸発要求量を反映した値である(もっと背の高いポットを使用すれば、黒ぼく土ポットと水ポットの週間蒸発量は同じになると考えられる)。一方、ライシメータでの蒸発も蒸発要求量によって決定される。ポットとライシメータでの蒸発要求量自体の違いが、 $E_0 \gg E$ の原因と考えられる。即ち、ポットでは昼夜を通じて容器を介しての熱の供給が多く、温度が上がりやすく、そのため飽和水蒸気圧が高く保持されたためと考えられる。そのほか、ポットの設置面がライシメータ表面より20cm程度高いことの影響も考えられるが、その影響はポット蒸発量の10%以下であり、 $E_0 \gg E$ の主要な原因ではない。

ポット蒸発量の方が日射量との相関が良いのも、ポットの温度が日射により上昇し易いためと考えられる。ライシメータの場合、日射が少ない場合には温室空気からの顕熱fluxがより多く蒸発潜熱に利用されるため、蒸発量は晴天時との差がそれほど開かない。

4. あとがき

裸地ライシメータでの水収支特性を検討した。その結果は3・2に要約されており、蒸発特性がライシメータでの水収支を支配していることが推察された。その推察を検証すべく蒸発特性を詳しく検討した。その結果、次のことが明かとなった。

- 1) 熱収支法で推定したライシメータでの蒸発量は、水収支法で算定した値と良い対応を示した。
- 2) 水ポット蒸発量は、定性的な傾向は水収支法の蒸発結果と良く対応するものの、昼夜を通して過大な蒸発量を与える結果となった。
- 3) 熱収支法による結果と水ポット蒸発法による結果は、夜間の蒸発量は両ライシメータで差がないことを示唆する。日射量の違いに起因して、両ライシメータで日中の蒸発量に大きな違いが現われた。
- 4) 熱収支の内訳から、温室内の気温、湿度、土壌温度が制御されているため、ライシメータでは顕熱fluxがほとんど下向きとなり、蒸発を促進していることが分かった。野外で言えば、昼夜を通じて暖かく乾いた大気に移流してくることに対応している。
- 5) 両ライシメータでの蒸発はどの実験条件下でも恒率蒸発段階と考えられ、外的条件にのみにより蒸発速度が決定されている。

今回得られた結果は、土壌層内の毛管水が表面まで途切れていないことが大きな要因と考えられる。また、ライシメータ内の地下水位の設定方法はオーバーフロー型であるために、水位上昇時には機能するが、下降時には機能しない。そのため、蒸発の形態としては、地下水面の存在しない場合の乾燥型蒸発である⁶⁾。

今後、Lysi. #4での日射量と両ライシメータでの放射収支を測定して、解析時に導入した仮定を検証する予定である。また、毛管水が途切れるような実験条件下での水収支特性についても検討する必要がある。さらに、ライシメータの内では蒸発と水分の再配分の両過程が同時に進行しており、両者の相互作用などについても検討すべき課題として残された。

最後に、屋外での日射量のデータは当研究所の藤沼康実主任研究員から提供して頂いた。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大坪国順・久保井 徹：大型ライシメータ不飽和浸透実験 — パソコンによる計測制御およびデータ解析の効率化 —、土木学会水工学論文集、Vol. 34, pp. 695-700, 1990.
- 2) 大坪国順：大型ライシメータにおける土壌水分の移動特性 (IV)、土木学会第45回年次学術講演会講演概要集 II、pp. 8-9, 1990.
- 3) 大坪国順：大型ライシメータを用いた裸地土壌での水収支に関する実験、日本砂漠学会第1回学術大会概要集、pp. 25-26, 1990.
- 4) 大坪国順：裸地土壌での蒸発量に関する実験的検討、環境科学シンポジウム1990, pp. 9, 1990.
- 5) 日本農業気象学会関東支部編：農業気象の測器と測定法、農業技術協会, pp. 171-199.
- 6) Daniel Hillel (岩田進午監修、高見晋一・内島善兵衛共訳)：土壌物理学概論 — 土地と水の科学 —、養賢堂, pp. 180-198.
- 7) 土壌物理研究会編：土壌物理用語事典、養賢堂, pp. 117-118.