

大型ライシメータによる裸地蒸発量の観測・評価

池淵 周一・土谷 史郎

久保 和幸・光田 寧

OBSERVATIONAL STUDY OF EVAPORATION FROM BARE SOIL USING A LYSIMETER

By Shuichi IKEBUCHI, Shiro TSUCHIYA, Kazuyuki KUBO and Yasushi MITSUTA

synopsis

To know an exact amount of evapotranspiration is important not only for the planning and management of water resources, but also for the understanding of the mechanism of hydrological cycle. Then we especially take up an evaporation from bare soil.

A lysimeter was developed for measurement of evaporation in the air-ground interaction observing system at Uji ground. In this paper, we make a statistical treatment about observation data and analyze the correlation between evaporation from the lysimeter and other meteorological elements. And finally, we present efficient formulas to estimate the amount of evaporation at several time intervals according to the expanded Penman's method.

1. はじめに

流域からの蒸発散量を正確に知ることは治水・利水の面からも、また、水収支や流出モデルの精度の向上からもきわめて重要な課題である。しかし、その影響因子が数多く存在し、かつ、降雨のように目に見える現象ではないので蒸発に関する研究は他の気象・水文関係の研究に比べて立ち後れているというのが現状である。流域蒸発散といえども林地、草地、水面など多くの異なった蒸発面を持っているが、池淵らはすでに林地および水面蒸発については観測研究を実施し、いくつかの成果をあげてきている¹⁾²⁾³⁾。

京都大学防災研究所水資源研究センターでは、暴風雨災害部門と共同で地空間相互作用実験場に大型ライシメータをはじめとする各種観測機器を整備し、地表、大気系の熱および水の移動過程に関する現地実験的研究を実施しており、その一つの重要な評価に蒸発量を取り上げている。この実験場は裸地であり、裸地からの蒸発を観測することとなる。

大型ライシメータによる蒸発量値を真の値とみなすなら、多くの間接的な蒸発量推定法との比較が可能となるので、渦相関法、傾度法、熱収支法などの裸地面への適用を試みることもできる。しかし本研究はまず、実用的なモデル構成に焦点をあて、実験場に設置された観測機器から得られる気象・水文データを元に統計的分析を行なうことにより、裸地からの蒸発量と他の気象要素との相関関係を明らかにするとともに、裸地からの蒸発量推定式を構成しようとするものである。

2. 観測システムの概要

地表・大気系における水および熱の移動過程に関する現地実験的研究を推進するために京大防災研究所の暴風雨災害部門、水資源研究センターが中心となり観測システムを整備してきた。その観測システムも昭和61、62年度に導入された大型ライシメータによりほぼ概成した。これらの観測システムは京大宇治グラウンド南側の地空間相互作用実験場に設置されており、観測の対象としている露場は東西に約70 m、南北に約50 mの広さを持ち表面の凹凸が数cm程度の裸地である。設備の展開されている周辺の地形及び測器の配置、観測の概要については前報⁴⁾⁵⁾においてすでに述べられているので、ここではその後新たに設置された赤外線土壌水分計および比熱式土壌水分計と自動観測化された大型ライシメータについて述べるにとどめる。

赤外線土壌水分計 (Photo. 1) は昭和62年6月より測定を開始した。これは、測定対象物の赤外線吸収を利用した反射方式のオンライン水分計であり、長期間にわたって地表面の土壌水分量を非接触で測定することができる。比熱式土壌水分計は地下10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cmの位置に埋設されており、昭和61年11月より測定が開始されている。これは、土壌に含まれる水分と土壌の比熱が一定の関係にあることを利用して土壌中の一点に熱を加え、その温度上昇から水分を察知するものである。しかし、現時点では水分計の指示値と水分の絶対値との関係は得られておらず、実際の土壌水分量への変換は行なわれていない。他に土壌水分量の計測にはテンショメータを付けた水分計が地下10 cm, 20 cmの位置に設置されているが、比熱式土壌水分計と同様に数多くのサンプリングを必要としており、観測値から実際の土壌水分量への変換を難しくしている。

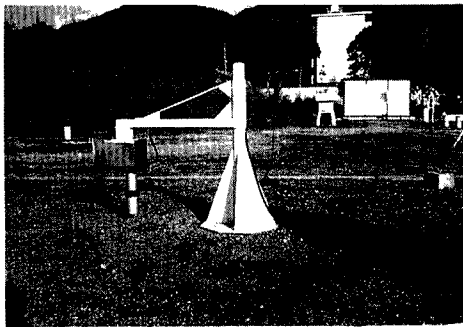


Photo. 1. Infrared soil moisture-meter.

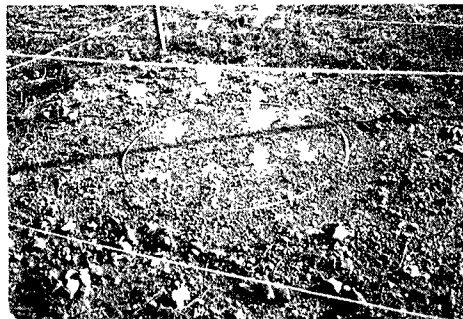


Photo. 2. The rim seen in the center of this photo is the top of lysimeter.

大型ライシメータは昭和61年度より導入され、昭和62年8月に自動観測システムが完成し現在に至っている。大型ライシメータとは、自然状態における降雨・浸透・蒸発などによる土中の水分や熱の移動をその重量変化で測定する装置であり、ここで用いたものは機械式計量器の上に半径600 mm、有効高さ600 mmの土砂タンクが設置されている。土砂タンクを浸透してきた水は貯水タンクにプールされ、貯水型流量計によってその積算排水量が求められる。なるべく自然の状態に近づけるために土砂タンクの上端を地表面に一致するように埋め込み周囲の土砂と同一条件の土砂をタンク内に満たし、安定化のために6ヶ月以上経過した後から測定を開始した (Photo. 2)。また、地下観測室に露出したタンク底部および重量変化をキャッチするロードセルが温度変化によって補正を施さねばならないほどに変化しないように、外気とは二重ドアで締め切り地下室と換気ファンを設置するとともに室温も測定した。ライシメータからの信号 (土砂タンク重量、積算排水量、室温) は信号用の溝を通して、観測室内のデータレコーダ (CHINO AR) によってフロッピーディスク上に連続して収録されている。

3. データ処理と観測結果

本章では、蒸発量に関する回帰分析を行なう前のデータ処理段階として、裸地蒸発量の算出、各測定項目の収集状況について述べる。また、得られた各測定項目の観測結果を示すとともに、それらの時系列特性について考察する。

3.1 裸地蒸発量の算出

前章で述べたようにライシメータにおいては土砂タンク重量と積算排水量が測定されており、また前報⁴⁾で紹介されているように従来より降雨量も観測されている。これらのデータをもとにライシメータ内の水収支から実際の裸地蒸発量が求められる。

ライシメータ内の水収支を次のように考える。

$$(\text{土中の水分変化量}) = (\text{降雨量}) - (\text{排水量}) - (\text{蒸発量}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

この場合、横の流入・流出については無視できるものとした。ここで、土中の水分変化量とはすなわちライシメータの重量変化を意味するから、土砂タンクの半径 (600 mm) や各観測値の単位を考慮すると Δt 時間当たりの蒸発高 $E(t, t+\Delta t)$ (mm) は次式で表わされる。

$$E(t, t+\Delta t) = \{I(t+\Delta t) - I(t)\} - \{S(t+\Delta t) - S(t)\} / 0.36\pi - \{Q(t+\Delta t) - Q(t)\} / 360\pi \quad \dots (2)$$

ここに、 $I(t)$ 、 $S(t)$ 、 $Q(t)$ はそれぞれ時刻 t における積算降雨量 (mm)、土砂タンク重量 (kg)、積算排水量 (cm³) の値である。ただし、水の単位体積当たり重量は 1.0 g/cm³ として計算した。

ここで、算出された蒸発高 E (mm) の精度について考えてみる。式 (2) において用いられた測定値のうち、土砂タンク重量、積算排水量、降雨量の測定精度はそれぞれ 200 g、25 cm³、0.5 mm であり、それらを式 (2) に基づいて蒸発高に換算すると 0.18 mm、0.02 mm、0.5 mm となる。いま、これらの値を標準誤差と考え (ただし、降雨量については 0.0 mm か 0.5 mm の二つの値をとる誤差をもつとして 0.25 mm の標準誤差を与える。) 式 (2) の左辺、すなわち蒸発高の標準誤差を計算すると 0.45 mm 程度となる。一方、無降雨時間帯には精度の悪い降雨量が入らないので蒸発高の標準誤差は 0.25 mm 程度となる。

3.2 データの収集状況

地空間相互作用実験場では、1987 年 8 月末から集中観測を開始しており、またライシメータの自動観測もほぼ同じ時期から行なわれている。そこで、本研究ではデータの取得・整理状況から 9 月・10 月の 2 ヶ月間を解析の対象期間とした。

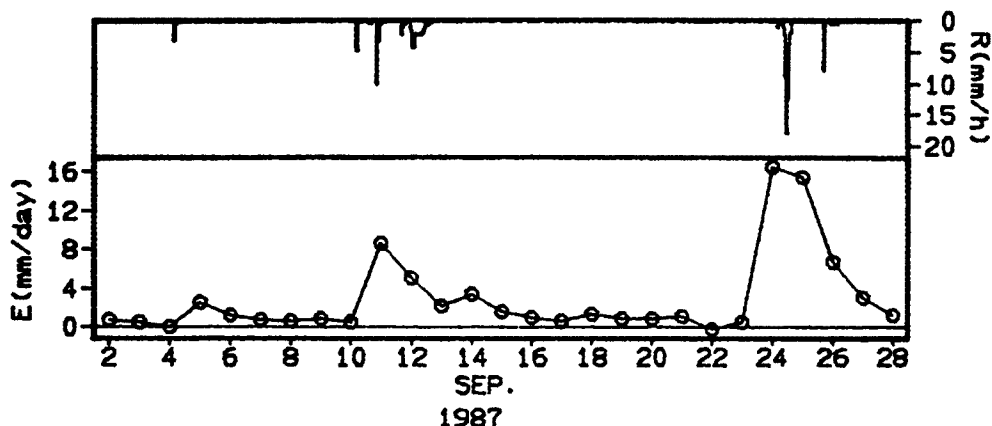


Fig. 1. Daily evaporation calculated by water balance method from the measured values.

観測データの記録には3通りの方法があり、カセット式磁気テープには降雨量、純放射量、地表面温度、風速、気温、露点温度、地表面土壌水分量などが1分もしくは5分刻みで全期間を通じて記録されている。これに対して打点記録計には比熱式土壌水分計指示値が1時間刻みで記録されており、その記録期間は9月1日0時から9月30日1時および10月3日17時から10月30日13時までの2期間である。また、フロッピーディスクにはライシメータの重量と排水量が1分刻みで記録されているが、記録の障害などのため有効なデータは9月1日18時から9月29日13時および10月5日18時から10月21日15時までの2

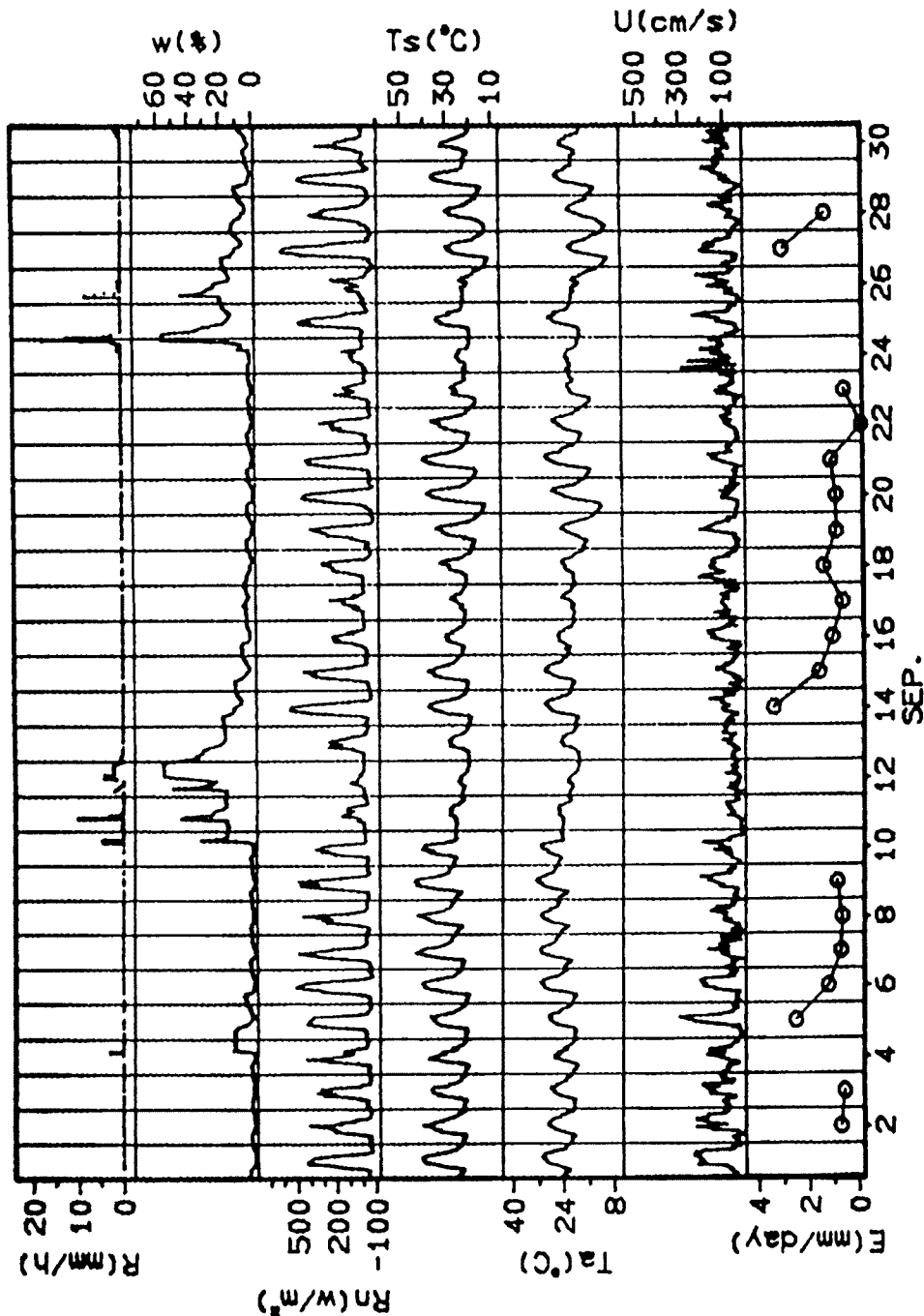


Fig. 2. Variation of the main meteorological elements in September, 1987.

期間となった。

これらの結果を踏まえて得られたデータから9月2日から9月28日までの日蒸発量 E (mm/day) を式(2)に基づいて算出した結果を Fig. 1 に示す。なお、 R (mm/h) は1時間当たりの降雨量を示す。降雨のない期間における蒸発量の変化は安定しているのに対して、雨天の日には蒸発量が増大していることがわかる。しかし、実際の現象として雨天の日に蒸発量が増大することは考えにくく、さらに、日量にして10 mm以上の蒸発が起こるというのは問題があるといわざるを得ない。これは降雨量計のメンテナンス

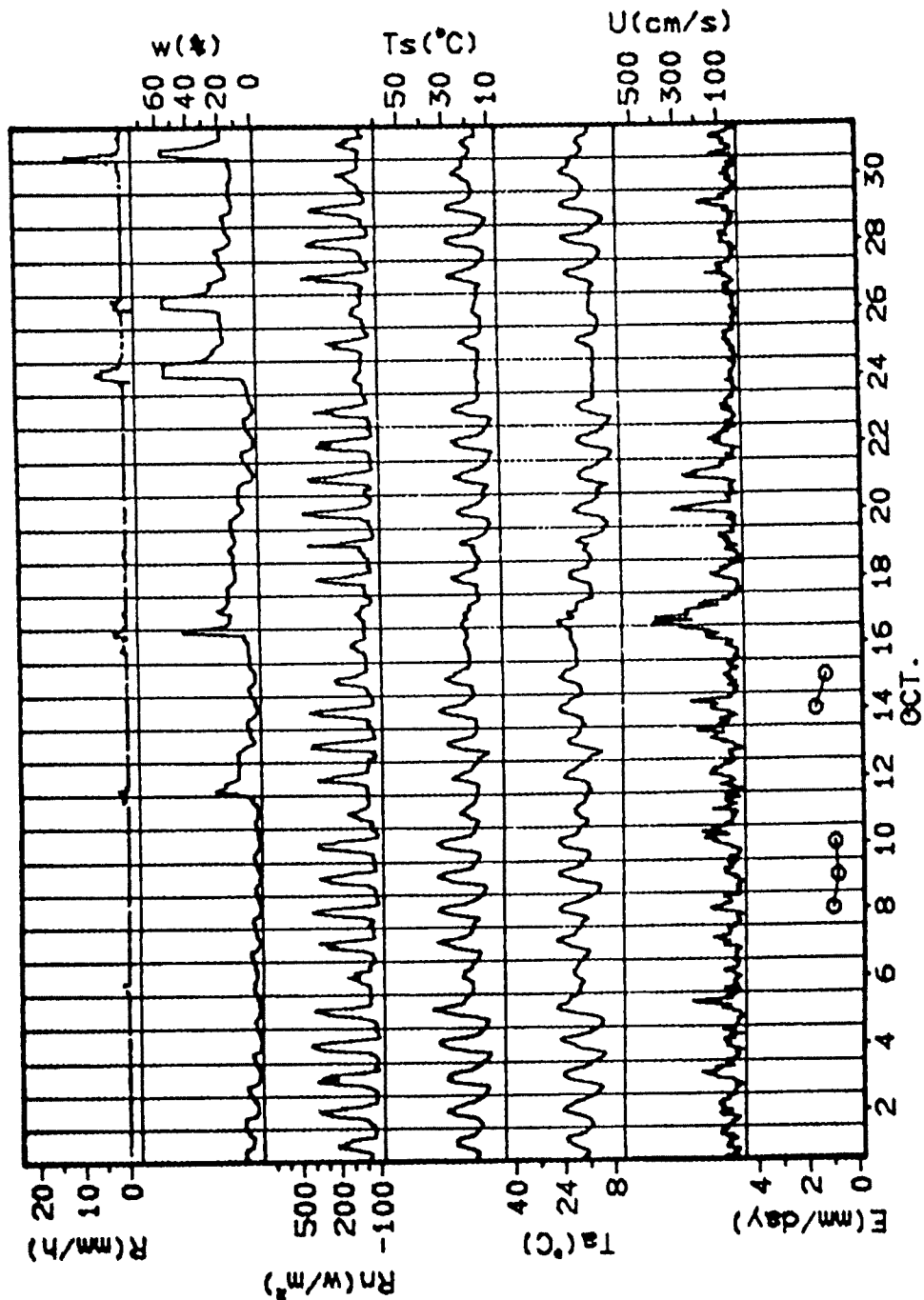


Fig. 3. Variation of the main meteorological elements in October, 1987.

ンスが不十分であったため、降雨量が実際の量よりも過少に観測され、式(2)からも分かるように蒸発量が過大に評価されたものと考えられる。降雨量計の精度の向上は、降雨日を含め正確な蒸発量を求めるうえで非常に重要であり、今後課題を残した。また、式(2)において横の流入・流出については無視できるものとしたが、激しい降雨の時などに疑問を残している。

以上の経過から、雨の日の蒸発量はやむをえず欠測扱いとし最終的に、回帰分析を適用するうえで有効な日数は9月では19日分、10月では5日分の計24日分となった。

3.3 観測結果

9・10月の2ヶ月間における主な気象要素の時間の経過による変化を表わしたものが Fig. 2, Fig. 3 であり、上から R : 降雨量 (mm/h), w : 地表面土壌水分量 (%), R_n : 純放射量 (W/m^2), T_s : 地表面温度 ($^{\circ}C$), T_a : 気温 (高さ 1.5 m) ($^{\circ}C$), U : 風速 (高さ 1.5 m) (cm/s), E : 日蒸発量 (mm/day) の順で示してある。

土壌水分量は降雨量と同じ様な変化をしており、降雨のない時には昼間には蒸発、夜間には凝結という現象を示すような変化をしている。また、降雨直後から徐々に減少していく様子は蒸発量のそれとよく似通っており、蒸発ポテンシャルと実蒸発量との間に介在する重要な要素の一つであろうと考えられる。

Fig. 4 は9月における降雨量と地下 10 cm, 30 cm, 60 cm の深さの土壌水分値 (比熱式土壌水分計の自記記録指示値であり、水分量 (%) に換算したものではない。) を表わしたものである。地下 20 cm, 40 cm でも計測は行なわれているが、30 cm のところの値とほぼ同じであるのでこの図からは省略した。下層の変化に比べて表層に近い地下 10 cm のところの変化が激しく日内変化が顕著に表われている。また、降雨のあったところに注目してみるとまず最初に地下 10 cm の指示値が増加しつづいて 30 cm, 60 cm の指示値が増加している。このことから雨が徐々に浸透している様子が伺える。ただ、地下 60 cm での指示値がほかの深さの値にくらべて小さな値を示しているが、これがセンサー埋設の際に問題があったのか、このあたりの深さが現地盤 (現地は建設残土処分地で整地されたものである。) であり土壌特性が異なるのか、その原因はよく分からない。

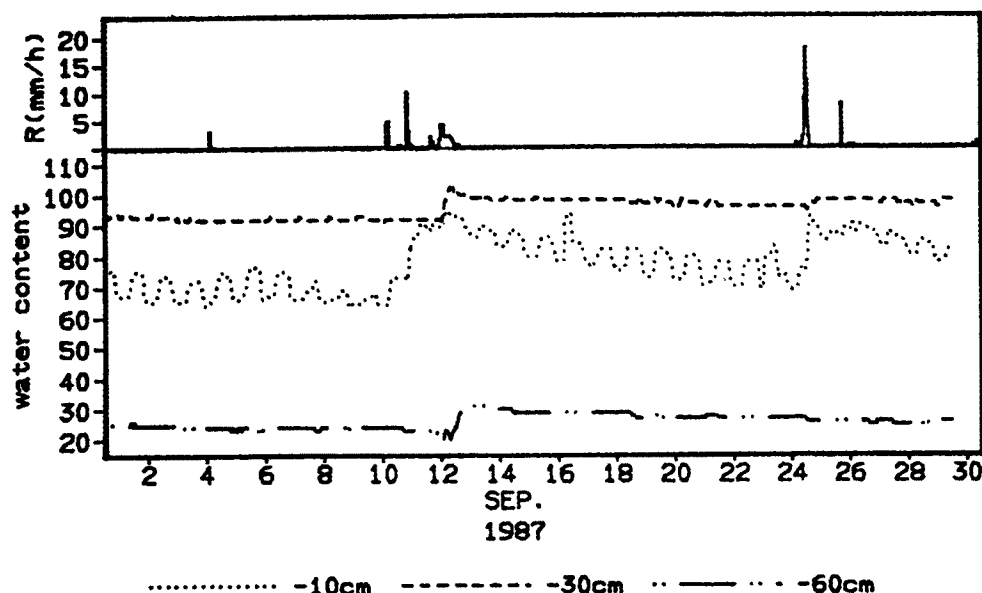


Fig. 4. Water content under ground observed by the soil moisture-meter (Specific heat type).

4. 回帰分析の適用とその考察

本章では前章で得られたデータを用いて裸地蒸発量と地の気象要素との間に回帰分析を適用する。まず最初に、蒸発量と各気象要素との相関係数を求めることにより裸地蒸発量に影響を与える気象因子について考察し、さらにそれに基づき裸地蒸発量推定のための回帰分析を行なう。

4.1 裸地蒸発量に影響を及ぼす因子について

前章までは、蒸発量を全て日単位で表わしてきたが、本章では3, 6, 12, 24時間単位で表わし、統計処理ならびに考察を進めていく。なお、3時間単位以下の蒸発量はほとんどが3.1において述べた標準誤差 0.0 ± 0.25 mmの範囲に入っており、誤差による影響が大きくなるため解析の対象からはずした。

Table 1 は蒸発量と主な気象要素との各時間間隔における相関係数を求めたものである。ここで示した項目のうち、相関係数を求める際、蒸発量と純放射量は各時間間隔での総量を用い、地表面温度、気温ならびに風速は時間平均値を用いた。また、飽和水蒸気圧ならびに水蒸気圧は気温、露点温度の時間平均値から求められた値を用いた。

Table 1. Correlation coefficients between evaporation and other meteorological elements at several time-intervals

Time-interval	R_{net}	T_s	T_a	$T_s - T_a$	U	$e_a^* - e_a$	w_s
3	0.679	0.426	0.289	0.501	0.392	0.430	0.122
6	0.731	0.401	0.257	0.500	0.392	0.417	0.242
12	0.732	0.384	0.225	0.509	0.463	0.559	0.371
24	0.728	-0.161	-0.123	-0.204	0.199	0.037	0.860

R_{net} : Net radiation T_s : Surface temperature T_a : Air temperature

U : Wind velocity e_a^* : Saturated vapor pressure

e_a : Vapor pressure w^* : Surface soil moisture

純放射量はどの時間間隔においても0.7程度の高い相関を示しており、露場への主要なエネルギー供給源として蒸発に対して支配的な要因であることを示唆している。**Fig. 5**には純放射量と蒸発量との散布図を示しておいた。地表面土壌水分量は時間間隔が長くなるにつれて高い相関を示している。しかしながら相関係数の大小に関わらず、土壌水分量は蒸発面への水分の供給という意味で、裸地蒸発過程においては必要不可欠な量であり、回帰分析を行なう際にもその取り扱い方が重要となってくると考えられる。また、ここで示された他の気象要素すなわち気温、水蒸気圧、風速などについてはこれら単独では特に高い相関を示さなかったが、純放射量とあいまって蒸発ポテンシャルを決定する要因には変わらないのでそれらの組み合わせあるいは加工によって、それらが蒸発量にどのような関わりを持つか、その一つの具体化を次節で展開する。

4.2 裸地蒸発量推定式の構成

今回得られた気象データから裸地蒸発量推定式を構成する場合、その変数の組み合わせにより多様な式が存在する。そのなかから無作為に選出された式に対して回帰分析を行なうことはあまり有意義ではない。そこで、ここでは従来より水面蒸発量推定式としてよく用いられているPenman式を基本として推定式を構成することとした。Penman式は裸地のみならず草地においても、水分が十分に供給されている場合にはかなり良い近似度で実蒸発散量を与えるといわれている⁶⁾。Penman式は次式で与えられる。

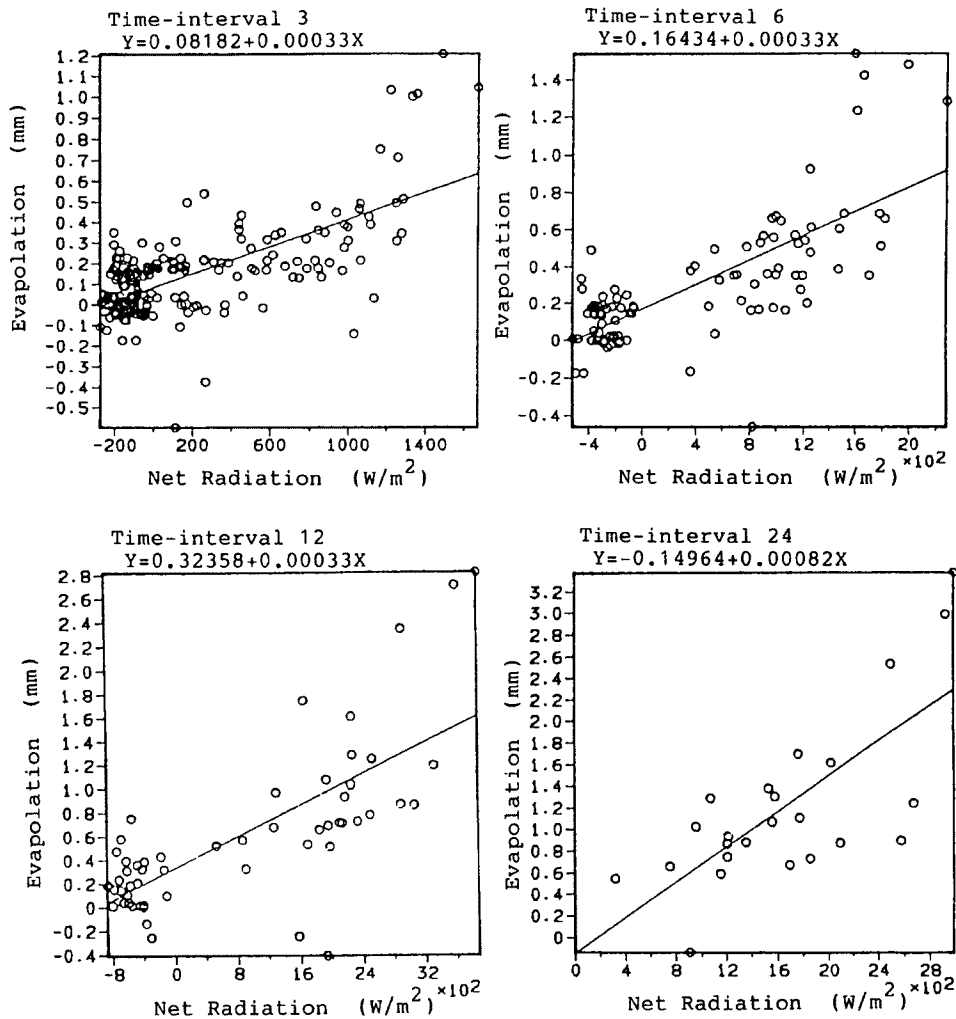


Fig. 5. Relation between evaporation and net-radiation at several time-intervals.

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_{net}}{L} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_a^* - e_a) \quad (3)$$

ここに、 E_p : 蒸発能 (cm/day), Δ : 気温～飽和蒸気圧線の勾配 (mbar/°C), R_{net} : 純放射量 (cal/cm²・day), $f(u)$: 風速 u の関数 (cm/day・mbar), e_a^* : 飽和水蒸気圧 (mbar), e_a : 水蒸気圧 (mbar), γ : 乾湿計定数 (mbar/°C), L : 水の気化熱 (cal/cm²) である。

式 (3) はいわゆる蒸発能を与える式であり、地表面での水分の供給が十分でない場合には満足できる値を与える式とはいえない。そのため、正確な裸地蒸発量推定式を得るためには何らかの補正を施さなければならない。そこで、実蒸発量を E_s として、次に示すような補正係数 κ を考える。

$$E_s = \kappa E_p \quad (4)$$

κ は定数として扱っても良いが、すでに砂田・池淵が林地蒸発散量推定に用いた飽和面積比率に相当する考え方⁷⁾を踏まえ、ここでは蒸発面への水分の供給度を表わす指標の一つとして、今回得られた観測データのうち地表面土壌水分量 w_s (%) を取り上げ、その一次関数として扱うこととした。すなわち、

$$\kappa(w_s) = a + bw_s \quad (5)$$

ここに、 a , b は定数である。

式(3)における風速関数 $f(u)$ については、時間平均風速 (cm/s) を用いて従来からよく用いられている一次式で近似する。すなわち、

$$f(u)=c+du \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 c 、 d は定数である。

以上より、裸地蒸発量推定式は次式のように表わされる。

$$E_s=(a+bw_s)\left\{\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_{net}}{L}+\frac{\gamma}{\Delta+\gamma}(c+du)(e_a^*-e_a)\right\} \dots\dots\dots (7)$$

4.3 回帰分析の適用結果と考察

式(7)を用いて、今回得られた気象データをライシメータから得られた蒸発量値に回帰させ、係数を求めた。Table 2に蒸発量を3, 6, 12, 24時間単位で扱い、それぞれの回帰係数を求めるとともに、相関比 η を求めた結果を示す。時間間隔が短くなるにつれて相関比の2乗の値が小さくなっているのは、この式による説明力の低下を意味するが、その一つには3.1で述べた観測による誤差の影響もあるものと思われる。Fig. 6には9月における推定値と観測値との比較を示す。特に、12時間単位以下の比較では降雨直後の変化を取り上げた。いずれの時間単位においても、時系列的に比較的良好な再現性を示した。Table 3には、得られた補正関数 $\kappa(w_s)$ のパラメーターをもとに、それぞれの時間間隔について解析の対象期間における土壌水分量の最小値、最大値、平均値から κ_{min} 、 κ_{max} 、 κ_{mean} を求めた結果を示す。いずれの時間間隔においても値の変動は大きく、Panman式によって与えられる蒸発能に対する補正関数の必要性を示すものとなっている。今後は、データを蓄積することによりこの補正関数の安定化、さらには線形関数のほかにたとえば指数関数的な補正関数を検討するなど、裸地における蒸発能と実蒸発量との関係を明らかにしていきたい。

本研究では、9月・10月の2ヶ月間のうち24日分のデータを対象として解析を行ってきた。地空間

Table 2. Regression coefficients and correlation ratios of the expanded Penman's equation at several time-intervals

Time-interval	a	b	c	d	η^2
3	1.25×10^{-1}	2.33×10^{-2}	1.46×10^{-2}	1.21×10^{-4}	0.618
6	1.01×10^{-1}	2.05×10^{-2}	3.46×10^{-4}	3.35×10^{-4}	0.726
12	7.27×10^{-2}	1.56×10^{-2}	3.79×10^{-2}	1.61×10^{-3}	0.812
24	2.54×10^{-1}	3.95×10^{-2}	-1.49×10^{-4}	6.62×10^{-4}	0.833

Table 3. Minimum, maximum, and mean values of correction term at several time-intervals

Time-interval	κ_{min}	κ_{max}	κ_{mean}
3	0.11	0.57	0.21
6	0.09	0.49	0.17
12	0.08	0.37	0.17
24	0.29	0.87	0.39

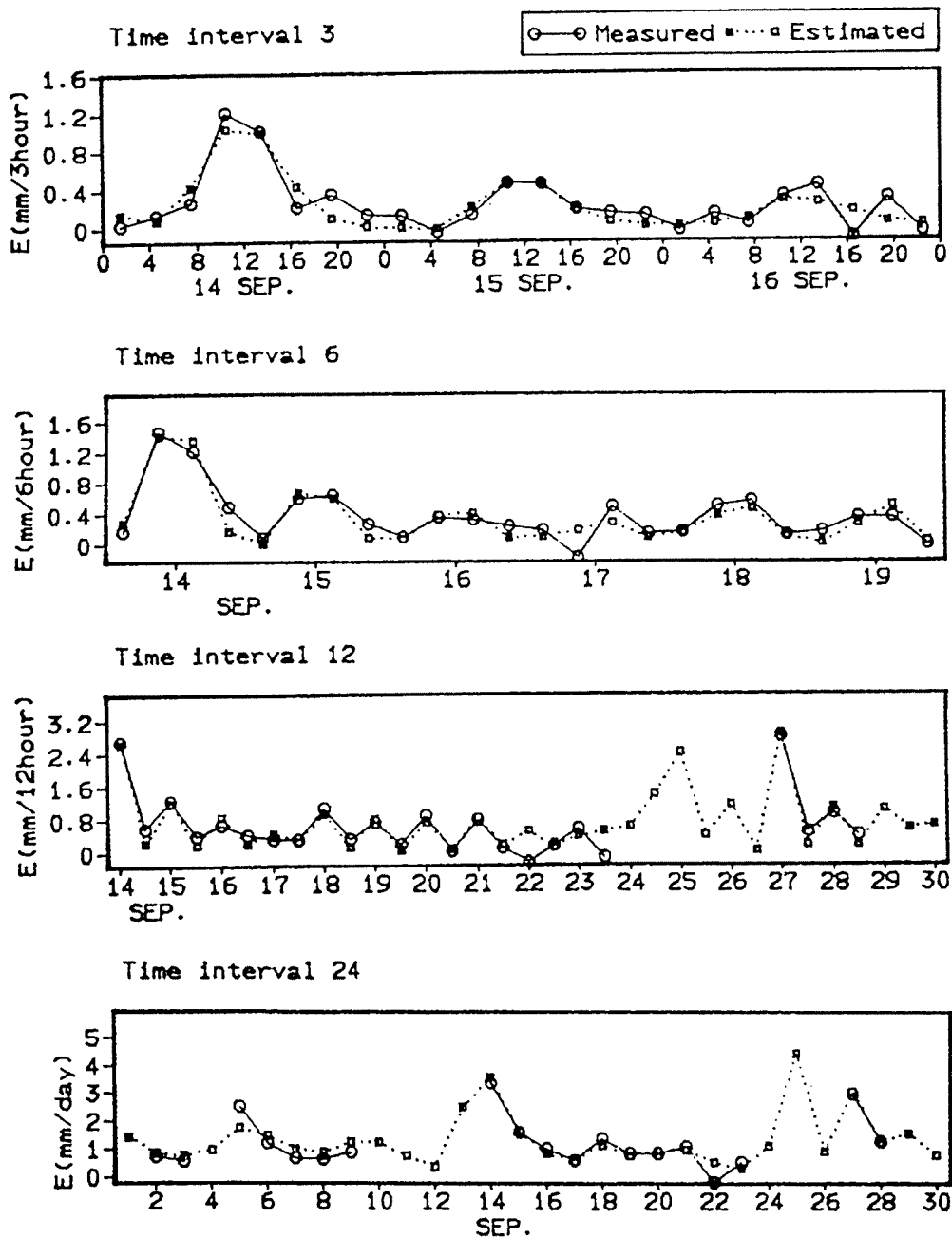


Fig. 6. Comparison of estimated and measured evaporation at several time-intervals.

相互作用実験場では現在も引き続き観測が行なわれており、さらにデータの数を増やしていき、ここで得られた推定式が1年を通じて正確な蒸発量を推定できるような式であるのか、あるいは季節ごとに回帰式を展開しなければならないのかを検討していきたい。

5. おわりに

本研究では9月・10月の2ヶ月間を対象期間として、ライシメータから得られた蒸発量と他の気象要素との間に統計処理を施すことにより各時間間隔において裸地蒸発量に影響を及ぼす気象因子を探り、さらに裸地蒸発量推定式を構成した。

ライシメータから得られる蒸発量値はその水収支により算出されるが、その値の精度は降雨時には0.45 mm程度、無降雨時には0.25 mm程度と計算され、微小な蒸発量の変化を捕らえることは、特に降雨日において困難であることがわかった。蒸発量を算出する際、降雨量が実際の量よりも過少に観測されたため、降雨時において蒸発量が10 mmを越える過大値を示すこともあった。蒸発量の精度は降雨量の精度に大きく影響されており、今後降雨量計の維持・管理を含め精度の改善が望まれる。

裸地蒸発量と特に相関が高かった気象因子は純放射量であり、0.7程度の相関係数が得られた。従来からいわれているように、種々の気象因子のうち蒸発過程に対して支配的な要因であることが確かめられた。

裸地蒸発量推定式は、水面蒸発量推定式として良く用いられているPanman式を基本にして構成し、さらに補正関数として土壌水分の項を乗ずることにより、地表の水分供給が不十分な状態での蒸発量の補正を試みた。得られた推定式は、比較的良好な再現性を示し、また裸地蒸発量に対する補正関数の必要性を示すものとなった。

今後は、データを蓄積することにより本研究によって得られた推定式の検証を行ない、さらに説明力の高いしかも安定した推定式を構成していきたい。さらには、こうした統計的分析によって、3時間単位以上の蒸発量についてはかなり実用的に推定できることがわかったが、それ以下の時間単位では精度上ライシメータによる観測的研究はきわめて困難である。幸い、地空間相互作用実験場では地表面下のいくつかの深さで土壌水分量や地温を測定しているので、これらのデータを地上部の気象観測データとあわせて活用し、より物理的根拠のある基礎方程式系をベースとしたシミュレーションを展開することによって、その一つのアウトプットとして蒸発量を算定し、ライシメータから得られる値との比較から基礎方程式の妥当性、含まれるパラメータの同定などに拡張していきたい。

参考文献

- 1) 池淵周一・沢井康：熱収支法による林地内蒸発散量の推定，京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告，1983，pp. 29-50.
- 2) 池淵周一・沢井康：林地蒸発散量の長期間にわたる時系列推定，京大防災研年報，第28号B-2，1985，pp. 157-177.
- 3) 池淵周一・竹林征三・大藤明克：琵琶湖湖面蒸発量の観測と評価，第30回水理講演会論文集，1986，pp. 1-6.
- 4) 光田 寧・池淵周一・田中正昭・文字信貴・小尻利治：大気と地表面間におけるエネルギー交換過程の観測（1），京大防災研年報，第29号B-1，1986，pp. 271-281.
- 5) 光田 寧・池淵周一・文字信貴・小尻利治・玉川一郎：大気と地表面間におけるエネルギー交換過程の観測（2），京大防災研年報，第30号B-1，1987，pp. 287-295.
- 6) Kazuo KOTODA: Estimation of River Basin Evapotranspiration, Environmental Research Center Papers, No. 8, 1986.
- 7) 砂田憲吾・池淵周一：林地流域における日蒸発散量の推定，土木学会論文集，第387号/Ⅱ-8，1987，pp. 247-254.