

# ウエイングライシメーターによる蒸発散量のバラツキの原因とその改善について

田 少奮\*・檜山 哲哉†・杉田 倫明‡

## I はじめに

植生からの蒸散を含んだ地表面からの蒸発散量は、地表面熱収支・水収支を評価する上で大変重要な要素となっている。水理実験センターでは、蒸発散量は2つの独立した方法で求められる。一つはウエイングライシメーター（以下、ライシメーターとする）により直接測定する方法、もう一つは熱収支式に基づき間接的に推定する方法である。檜山ほか（1993）によると、1990年頃からライシメーターによる蒸発散量の1時間平均値は大きくばらついており、日平均値にはそれ程大きな影響はないものの、日変化を評価するには大きな問題となっている。そこで、蒸発散量の1時間平均値のバラツキの原因について調査を行い、改善処置を行ったので、その結果についてを報告する。

## II 蒸発散量のバラツキの原因

ライシメーターは周囲と同じ状態の土壤で充たされている円筒形の容器であり、土壤の表面には周囲と同じ植生が生えており、容器自身は電子天秤の上に乗っている。この容器の重さの変化をとらえることによって蒸発散量を測ることができる（古藤田ほか、1978）。観測されるデータはオンラインで研究棟に送られ、熱収支・水収支観測データ処理システム（以下日報作成装置とする）によってリアルタイムで処理される。日報装置作成当時のパソコンの処理能力の制限のため、日報作成装置は2つの部分に

分かれている。データのサンプリングおよび1分間の平均値の計算と記憶は入力マイコン（RL-4255、以下マイコンとする）の内部で行われる。プログラムは高速化を図るため、アセンブラで書かれ、ROM（読み取り専用メモリ）化されているため、変更は困難である。データのリアルタイム表示（1分間の代表値）、1時間の平均値および日統計量（日平均値/積算値、最大値と最小値）の印刷とフロッピーディスクへの保存はパソコン J3100SL（以下PCと称する）で行われる。このプログラムはBASICで書かれているので、変更は比較的容易である（鳥谷ほか、1989）。マイコン内部では、次のようにデータを取得し、処理を行っている。各項目について、毎分に0.68sの間隔でデータ  $x_i$  を連続的に4回サンプリングを行う。この4つのデータ  $x_i$  の平均

$$x_m = \sum_{i=1}^4 x_i / 4 \quad (1)$$

を毎分の代表値  $x_m$  とする。集計は正時を境に行われる。毎正時より前の60個の毎分の代表値の平均

$$X_h(I) = \sum x_m / 60 \quad (2)$$

をI時の代表値とする。気温などの大部分の項目についてはこの値をI時の平均値として用いられる。本センターで取得している項目のうち、降水量、パン蒸発量と蒸発散量はさらに1時間前の値との差

$$ET(I) = X_h(I) - X_h(I-1) \quad (3)$$

\* 筑波大学水理実験センター † 筑波大学大学院・地球科学研究科 ‡ 筑波大学地球科学系・水理実験センター

を1時の平均値として定義している。

ところで、降水量の処理の際、雨量計の出力はフルスケールに達すると自動的にリセットされてしまうため、以上のように平滑化を行うと降水量が正しく測定できないということが分かった。これに対処するために、1989年11月に本システム更新時に、降水量および降水量に似た性質をもつ蒸発量と蒸発散量について(1)式と(2)式の2つの平滑化操作を省いてしまった。つまり、現行では、上記の3項目は1時とI-1時の2つの瞬間値の差

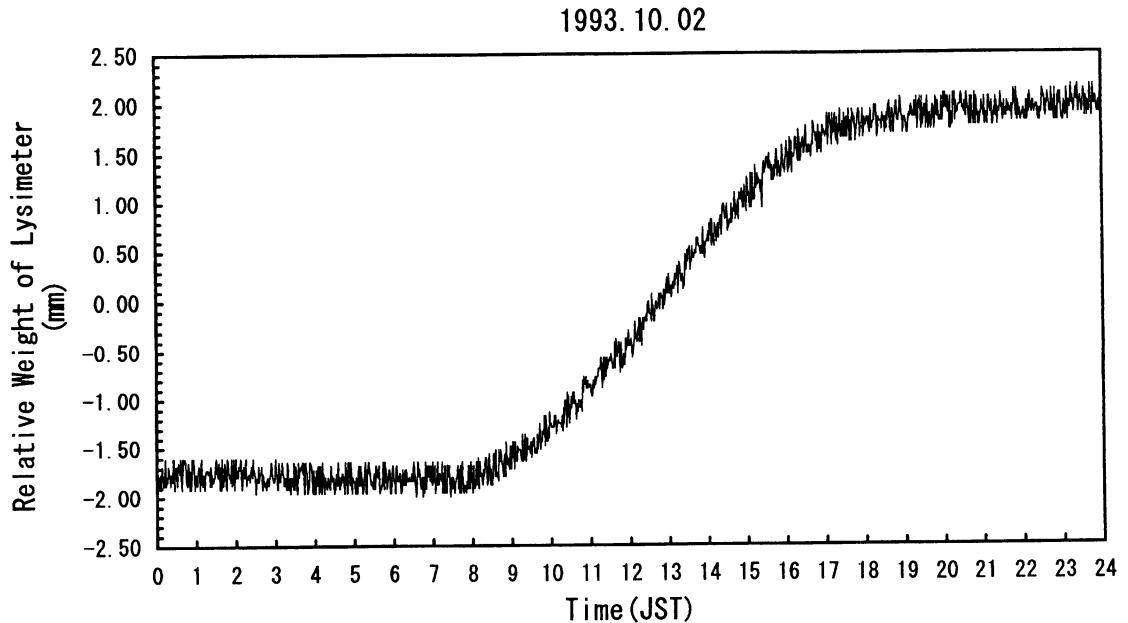
$$ET(I) = x_i |_{time=I} - x_i |_{time=I-1} \quad (4)$$

で計算されている。PCで取得できるのは毎分の代表値  $x_m$  と毎時の代表値  $X_h(I)$  などの1分以上のデータである。そこで、蒸発散について、 $x_m$  の変化の様相を調べるために、PCのBASICのプログラムを書き換えて  $x_m$  をフロッピーディスクに保存し、 $x_m$  の時間変化を調べた。第1図にその例(1993年10月2日)を示す。当日は降水がなく、晴天日であり、日積算日射量は  $768.6 \text{ W/m}^2$  であった。第1図から、時間帯によらず1日中、 $0.2 \text{ mm}$  位の振幅

のノイズが存在していることが分かる。瞬間値の差に基づいて、計算される時間蒸発散量  $ET(I)$  には最大  $0.4 \text{ mm}$  の誤差が生じる可能性があるということになる。一般に、晴れた日の最も蒸発の盛んな時間帯における時間蒸発散量は約  $0.6 \text{ mm}$  であるから、この誤差は非常に大きい。

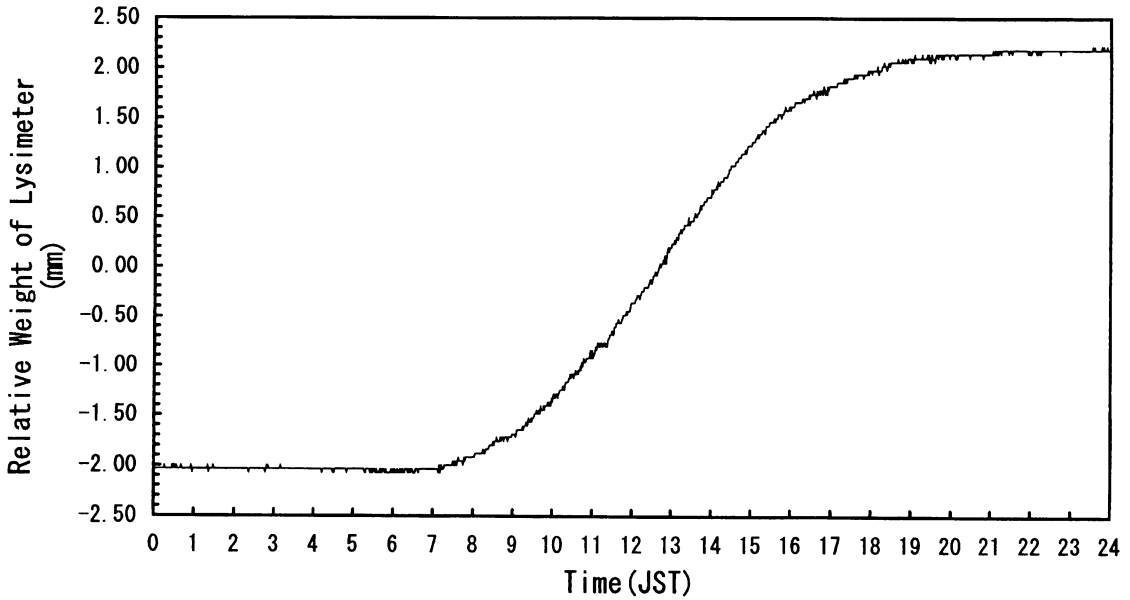
次に、マイコンへの入力信号にノイズが含まれているかどうかを調べることにした。オシロスコープで入力信号の波形を調べたところ、周期  $2 \text{ ms}$  (周波数  $50 \text{ Hz}$ )、振幅約  $2 \text{ mV}$  のノイズが存在することがわかった。入力アナログ信号  $\pm 1 \text{ V}$  に対して蒸発散量のフルスケールは  $\pm 79.6 \text{ mm}$  であるという関係から、このノイズの振幅はやはり  $0.2 \text{ mm}$  である。以上のことから、蒸発散量の誤差は入力信号に含まれるノイズによるものであることが分かった。このノイズがいつから発生するようになったかは明らかでないが、システム更新前にもすでにあつたと思われる。しかし、上に述べたようにマイコンで2回平滑化を行っているため、例えノイズが含まれていても除去されていたのであろう。

言うまでもなく、信号に含まれるノイズを取り除



第1図 1993年10月2日におけるライシメーター重さ ( $x_m$ , 単位は  $\text{mm}$ ) の毎分の出力の時間変化。ただし、比較のため、日平均値を引いてある。

1994. 08. 01

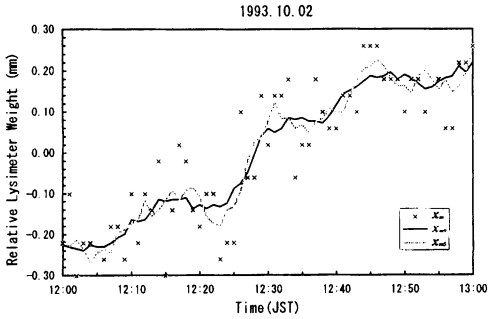


第2図 第1図と同じ、ただし、1994年8月1日のものである。

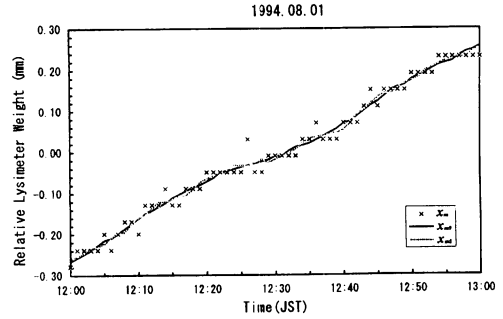
くことが根本的な改善策であるが、ライシメータの設置されている圃場の地下室から研究棟までの距離が長く、信号ケーブルが地下に埋設されているため、予算的には困難である。また、マイコンの内部のプログラムはROM化されているため、簡単に変更できないため、そこで、マイコンの手前にエム・システム社製のFVS型アイソレータを入れて入力信号に含まれているノイズを取り除くことにした。本アイソレータは主に電源に含まれる交流成分（高周波数成分）を除去するために用いられる。したがって、これを入れることによって、蒸発散量のような非常に緩やかな変動には影響がない。

第2図にノイズを取り除いた後のライシメータの $x_m$ の時間変化の1例（1994年8月1日）を示す。この日も降水がなく、晴天日であり、日積算日射量は $794.2\text{W}/\text{m}^2$ であった。第2図をみると、細かい周期の変動の振幅は約 $0.02\text{mm}$ となり、アイソレータを入れる前に比べて著しく小さくなった。これによる最大誤差は $0.04\text{mm}$ である。蒸発散量の場合、サンプリングする際、アナログ信号をデジタル信号に変換する時に1bitが $0.04\text{mm}$ に対応している。

つまり、蒸発散量の最小分解能は $0.04\text{mm}$ である。以上のことから、第2図に見られる振幅 $0.02\text{mm}$ の変動はサンプリング誤差である。このサンプリング誤差を除去するため、記録した毎分の $x_m$ に移動平均を施して、平滑化を試みた。比較のため、第3図と第4図にそれぞれアイソレータを入れる前後の $x_m$ 、5分間の移動平均と9分間の移動平均 $x_{m5}$ 、 $x_{m9}$ を示した。どの時間帯においてもほぼ同じ傾向が見られたので、ここでは、見やすくするために12:00~13:00の1時間のみを示した。第3図から、アイソレータを入れる前は、 $x_{m5}$ と $x_{m9}$ とも $x_m$ に比べてバラツキの振幅が小さくなっているが、やはり10~20分位の周期の振動が残っている。一方、アイソレータを入れた後の例では、移動平均によって $0.02\text{mm}$ の振幅の変動も平滑化され、第3図で見られた変動は見られずほぼ滑らかな変動を示している。 $x_{m5}$ 、 $x_{m9}$ の差は $0.01\text{mm}$ 程度である。移動平均を行うことによって、アイソレータを入れた後に残ったサンプリング誤差も取り除かれ、さらに安定した出力が得られるようになった。



第3図 第1図と同じ、ただし、12:00-13:00の1時間のみであり、 $x_m$  は生の値、 $x_{m5}$  と  $x_{m9}$  はそれぞれ5分と9分の移動平均である。



第4図 第3図と同じ、ただし、1994年8月1日のものである。

### Ⅲ ライシメータと熱収支法による蒸発散量の比較

前節でアイソレータをマイコンの手前に入れ、されに得られた毎分の代表値  $x_m$  に移動平均を施すことによって、バラツキが取り除かれ、非常に安定した出力が得られると述べた。また、前に述べたように、蒸発散量は2つの独立した方法で求められる。この節でこの2つの方法で求められる潜熱フラックスを比較してみる<sup>1)</sup>。檜山ほか (1993) を引用して、熱収支法とライシメータ法による潜熱フラックスの求め方を簡単に紹介する。熱収支法においては、地表面における熱収支は次式で与えられる

$$IE = R_N - G - H \quad (5)$$

ここで、 $R_N$  は正味放射量 ( $W/m^2$ )、 $G$  は地中熱流量 ( $W/m^2$ )、 $H$  は顕熱フラックス ( $W/m^2$ ) である。 $R_N$  正味放射計で直接測定される。 $G$  は地中熱流板で直接測定される。ここでは、深さ約2 cmの値を使用している。檜山ほか (1993) によれば、地表面から深さ2 cmまで土層における貯熱量の変化は無視できる。また、 $H$  は次式で与えられる。

$$H = \rho_a c_p \overline{wT'} \quad (6)$$

ここで、 $\rho_a$  は空気密度 ( $kg/m^3$ )、 $c_p$  は空気の定圧比熱 ( $J/kg/K$ )、 $w$  と  $T$  はそれぞれ風速の鉛直成分 ( $m/s$ ) と気温 ( $^{\circ}C$ ) である。バーは平均、プライムは平均値からの偏差を表す。 $\overline{wT'}$  の部分

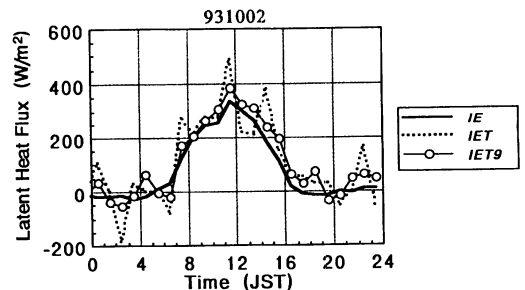
は超音波風速計によって測定された  $w'$  と  $T'$  よりアナログ演算装置を用いて計算される。なお、平均化時間は10分である。一方、ライシメータから得られる蒸発散量 ( $ET$ , mm) より、潜熱フラックス ( $IE$ :  $W/m^2$ ) は次式で求められる。

$$IE = ET \cdot \rho \frac{L_e}{\Delta t} \times 10^{-3} \quad (7)$$

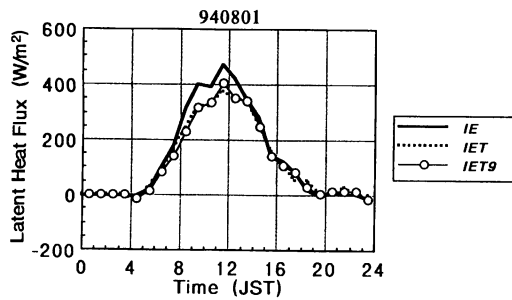
ここで、 $L_e$  は ( $T_a$ :  $^{\circ}C$ ) における蒸発の潜熱 ( $J/kg$ )、 $\Delta t$  は  $ET$  を測定した時間 ( $s$ )、 $\rho$  は水の密度 ( $1000 kg/m^3$ ) である。 $L_e$  は次式で求められる (Fritschen and Gay, 1979)。

$$L_e = 2500250(1 - 0.000946T_a) \quad (8)$$

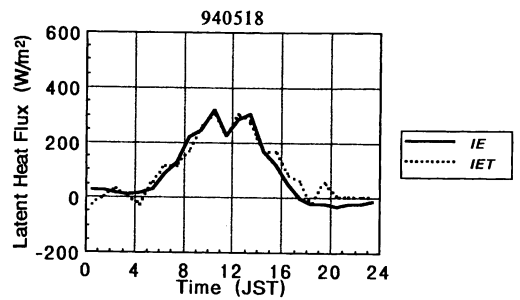
第5、6図にそれぞれ1993年10月2日と1994年8月1日の熱収支法とライシメータ法によって求められた潜熱フラックスの日変化を示した。アイソレータ



第5図 1993年10月2日における潜熱フラックス。IEとIETはそれぞれ熱収支法とライシメータによるもので、IET9は $x_m$ に9分の移動平均を施したものに基づくものである(詳しくは本文に参照すること)。



第6図 図5と同じ、ただし、1994年8月1日のものである。



第7図 第5図と同じ、ただし、1993年5月18日のものである。

を入れる前にはライシメータより求められた潜熱のフラックス ( $IE$ ) は、熱収支法から求められた値 ( $IE$ ) の日変化とは似ているが、大きくばらついている (第5図)。バラツキの幅は日変化の振幅とほぼ同程度である。これに9分間の移動平均を施したものの  $x_{m9}$  から計算した潜熱フラックス ( $IE_{T9}$ ) はよくなっているが、やはり、不自然な振動が残っている。当然ながら、檜山ほか (1993) の結果と同じである。一方、アイソレータを入れた後の  $IE_{T}$  にはバラツキがほとんど見られず、8-13時の間を除けば、 $IE$  とほとんど重なっている。 $IE_{T9}$  は更に  $IE$  に近づいている。8-13時の間には  $IE$  は  $IE_{T}$  より大きくなっている。他の日みると、このように両者がずれている日があれば、よく一致している日もある。一致している日の例を第7図に示す。また、古藤田 (1980) や檜山ほか (1993) も午前中は  $IE$  は  $IE_{T}$  より大きいが午後は逆に  $IE$  は  $IE_{T}$  より小さくなると報告している。このずれについて古藤田 (1980)、はライシメーターと地中熱流量を測定している圃場の地中熱流量の変化特性が若干異なっている可能性があり、また顕熱フラックスを求める際安定度を評価していないことに原因があるのではないかと説明している。しかし、檜山ほか (1993) によると、ライシメーターのと地中熱流量を測定している圃場の地中貯熱量変化の特性の違いによる効果は極めて小さい。また、顕熱を求める上で、古藤田 (1980) は傾度法を用いたのに対して、檜山ほか (1993) と本研究では渦相関法を用いているので、安定度を考慮する必要がない。更に、檜山ほか (1993) は地表面と超音波風速計の設置されている高さ (1.6

m) の間の大気貯熱量の変化の影響についても調べたが、その効果も極めて小さいということが分かった。檜山ほか (1993) の結果や、 $IE$  と  $IE_{T}$  が一致する日もあることから、両者のずれは地中貯熱量、大気の安定度と大気貯熱量の影響のいずれによるものでもない可能性が高い。

(5)式で潜熱を求める時、地表面状態が水平方向に一樣で、顕熱フラックスと潜熱フラックスの水平移流がないと仮定している。一般には、水平方向に十分長い距離にわたって地表面状態が一樣でない場合には、これらの水平移流の影響を考慮する必要がある。顕熱と潜熱の水平移流が顕著でない時には、 $IE$  と  $IE_{T}$  がよく一致するが、顕熱と潜熱の水平移流の影響が無視できない時は  $IE$  と  $IE_{T}$  の間に差異が生じると考えられる。今後、風向や風速別に両者を比較し、水平移流の影響を調べる必要がある。

#### IV まとめ

1989年11月頃から、ライシメーターで測定される蒸発散量が大きくばらつくようになった。その原因を調査し、改善処置を行った。改善処置前後のライシメーターによる蒸発散量を比較した。更に、ライシメーターによる潜熱フラックスと熱収支法による潜熱フラックスを比較した。その結果は以下にまとめられる。

1. ライシメーターによる蒸発散量のバラツキはデータ集録処理装置への入力信号にノイズが含まれていることに加え、1989年のシステム更新時に、入力マイコン内部で行われていた平滑処理を省いてしまったことによるもので

ある。

2. アイソレータによる高周波数除去をマイコン処理に先がけて行うことによってバラツキがほとんどなくなった。さらに、取り込んだライシメーターの毎分の入力データに5分間の移動平均を施すことによってサンプリング誤差が平滑化され、さらに安定した蒸発散量が得られるようになった。
3. 熱収支法とライシメーターによる潜熱フラックスの比較により、アイソレータを入れたことによって両者の対応が著しく改善されたことが分かった。
4. ノイズの周波数特性から、電源系統内で発生するものと考えられるが、発生源は明らかではない。今後、その所在を特定し、根本的に解決する必要がある。
5. 午前から昼にかけて熱収支法による潜熱フラックスはライシメーターによるものより大きい日が見られるが、その原因は今のところ解明できない。今後、水平移流の影響を調べる必要がある。

#### 注

- 1) 潜熱フラックスは単に蒸発散量をエネルギーの単位に換算しただけで、全く同じものと考えてよい。

#### 謝 辞

蒸発散量のバラツキの原因の調査に当たって東洋電子工業株式会社の西本貴久氏に全面的に協力していただいた。また、入力信号を調べる時水理実験センターの飯島英雄氏、株式会社カイジョーの杉山哲郎氏、そして国立極地研究所の岡田格氏にお世話になった。ここに記して御礼に代えさせて頂く。

#### 参考文献

- 古藤田一雄、佐倉保夫、林陽生、甲斐憲次 (1978) : 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について、筑波大学水理実験センター報告, No. 2, 65-89.
- 古藤田一雄 (1980) : ライシメーター蒸発散量とエネルギー収支法による蒸発散量の比較, 筑波大学水理実験センター報告, No. 4, 1-9.
- 鳥谷均・川村隆一・嶋田純・谷口真人・西本貴久 (1989) : 気象日報作成装置新システムについて, 筑波大学水理実験センター報告, No. 13, 147-158.
- 檜山哲哉, 杉田倫明, 三上正男 (1993) : ウエイングライシメーターと熱収支法による潜熱フラックスの比較, 筑波大学水理実験センター報告, No. 18, 41-53.
- Fritschen, L. J. and Gay, L. W. (1979): *Environmental Instrumentation*. Springer Verlag. 216pp.