

## ウェイングライシメータによる 蒸発散量長期観測データの解析と クオリティーコントロール

Analysis of Long-term Evapotranspiration Data Observed by  
Weighing Lysimeter and Its Quality Control

齊藤 誠\*・山中 勤\*\*

Makoto SAITO\* and Tsutomu YAMANAKA\*\*

### 1 はじめに

地表面から大気へ輸送される水蒸気量（すなわち，蒸発散量）は気象条件や気候変動に影響を及ぼす非常に重要なパラメータである．また，将来の気候予測をする上でも，様々な生態系における長期間の蒸発散量の変動についての良質な観測データを提供することが望まれている．筑波大学陸域環境研究センター（以下，TERC）における熱収支・水収支観測圃場（以下，観測圃場）は関東平野の東北部，筑波山の南方約 12 km の小貝川と桜川に囲まれた台地上に位置し，半径 80 m の円形をした草地となっている．当観測圃場では，水文観測データについては 1977 年 8 月から，気象・気候観測データについては 1978 年 8 月から観測がそれぞれ開始され，現在に至るまでの四半世紀以上にわたって継続的にルーチン観測が行われている．蒸発散量については，ウェイングライシメータ（以下，ライシメータ）による直接測定と，熱収支法による間接測定との 2 つの独立した方法によって求めることが可能である．

しかしながら，1990 年以降になりライシメータによる蒸発散量の 1 時間平均値にばらつきが見られるようになった事が檜山ほか（1993）によって報告されている．その原因として，田ほか（1994）は入力信号に含まれるノイズと蒸発散量を算出する計算処理を問題として挙げている．その後，1994 年 9 月 17 日には落雷のためにライシメータが故障し，1995 年 6 月 1 日より新しい秤で観測が再開された（田ほか，1995）．この更新に伴い秤量感度が 500 g（水深換算 0.16 mm）から 100 g（同 0.032 mm）に変更されたが，感度を上げた事により風の影響を受けるようになってしまった（田ほか，1995）．新村・杉田（1999）では，内部回路に平均化処理を行うコントローラーを導入し，平均化時間を 20 分に設定することで風の影響を取り除く事に成功している．このようにして，問題を含みながらも長期間にわたって取得された蒸発散量や水文・気象データは，現在 TERC ホームページ上（<http://erc3.suiri.tsukuba.ac.jp/>）で公開されており自由に利用することが可能になっている．そこで，本報告では公開されている

\* 筑波大学生命環境科学研究科大学院生

\*\* 筑波大学陸域環境研究センター

データをもとに蒸発散量のデータを整理し、その問題点を報告する。

## II データ説明

ライシメータは TERC 内の観測圃場のほぼ中央に設置されている。測定原理は、上皿式の大型の秤の上に土壌を入れた容器を載せ、蒸発散による容器の微小な重量変化を電子天秤で計測するものである。容器は直径 2 m、高さ 2 m のステンレス製であり、重量測定範囲は 0 ~ 250 kg、秤量感度は 100 g に設定されている。ライシメータは周囲と同じ状態の土壌で充たされており、土壌表面も周囲と同じ植生状態が保たれている。ライシメータの内部回路や構造の詳細については古藤田ほか (1978)、新村・杉田 (1999) などを参照されたい。ライシメータによって測定された蒸発散量 ( $ET$ ; mm) を潜熱フラックス ( $IE$ ;  $Wm^{-2}$ ) へ変換するには以下の式を使用した。

$$IE = ET \cdot \rho \cdot \frac{L_e}{\Delta t} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、 $L_e$  は気温  $T_a$  (°C) における蒸発潜熱 ( $J kg^{-1}$ )、 $\Delta t$  は  $ET$  を測定した時間 (s) であり本解析では  $\Delta t = 3600$  である。 $\rho$  は水の密度 ( $=1000 kgm^{-3}$ ) である。 $L_e$  は Fritschen and Gay (1979) より、

$$L_e = 2500250(1 - 0.000946T_a) \quad (2)$$

とする。

渦相関法システムは観測圃場中央にある気象観測鉄塔 (高度 30.5 m) の 2 高度 (1.6 m, 29.5 m) に設置されている。本報告では高度 1.6 m (夏期は植生の成長に伴い高度 2.2m に移動されるので注意。移動の時期などの詳細については各年の熱収支・水収支観測資料を参照されたい) で測定されたデータを使用する。渦相関法による潜熱フ

ラックス ( $IE$ ;  $Wm^{-2}$ ) は以下の熱収支式より算出した。

$$IE = R_n - G - H \quad (3)$$

ここで、 $R_n$  は正味放射量 ( $Wm^{-2}$ )、 $G$  は地中熱流量 ( $Wm^{-2}$ )、 $H$  は顕熱フラックス ( $Wm^{-2}$ ) である。顕熱フラックスは次式で与えられる。

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'} \quad (4)$$

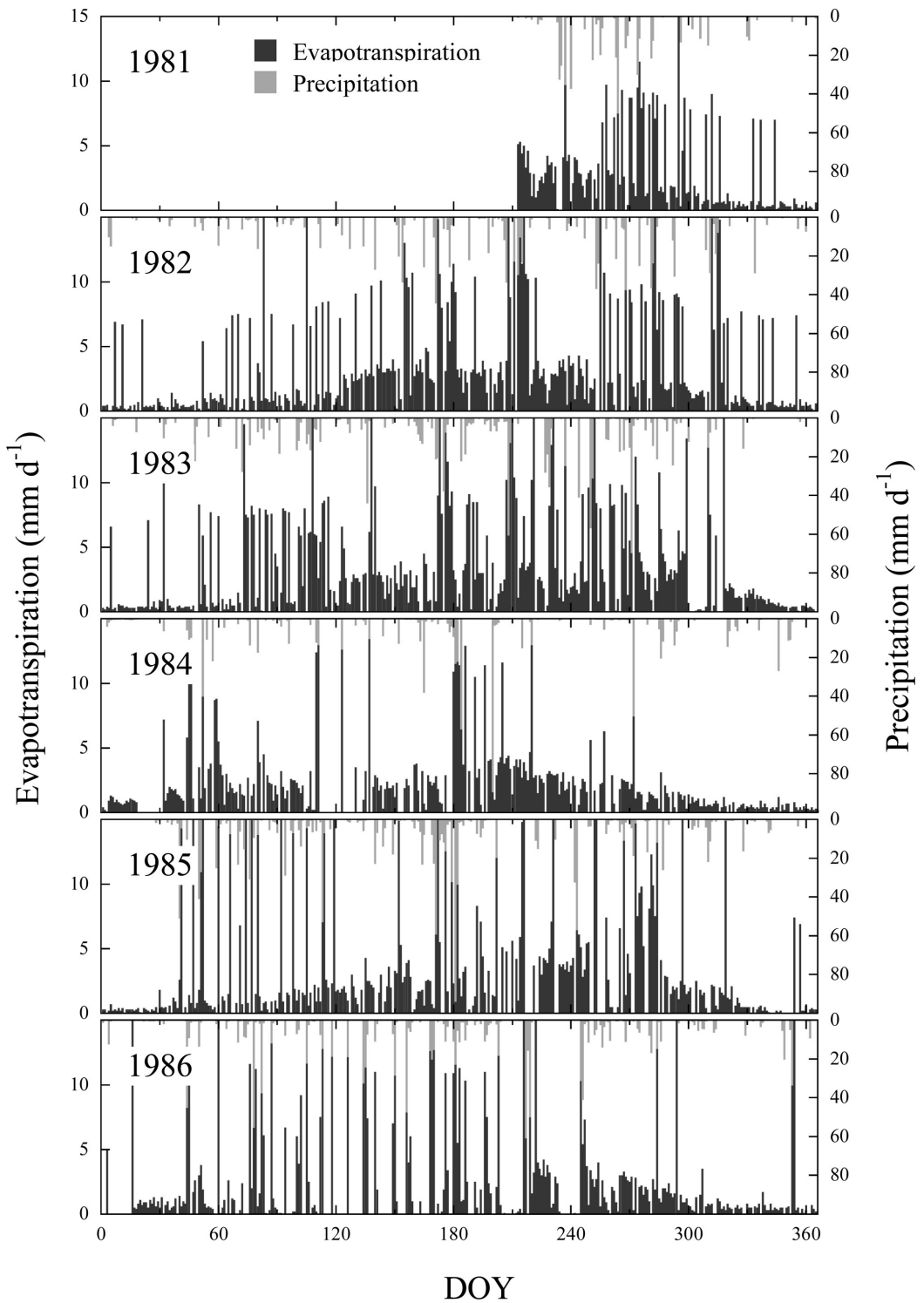
ここで、 $\rho_a$  は空気の密度 ( $kg m^{-3}$ )、 $c_p$  は空気の定圧比熱 ( $J kg^{-1} K^{-1}$ )、 $w$  は風速の鉛直成分 ( $m s^{-1}$ )、 $T$  は気温 (K) であり、 $\overline{w'T'}$  は超音波風速温度計によって測定された鉛直風と気温の共分散である (バーは平均、プライムは平均からの偏差を示す)。TERC における渦相関法システムの詳細については、古藤田ほか (1978)、齊藤・浅沼 (2004) などを参照されたい。また、大気や熱流板より上の土壌の貯熱の効果は非常に小さい事が楢山ほか (1993) によって報告されているため、本報告では熱収支式を解く上でこれらの貯熱量変化項は無視する。

本報告では、1981 年 8 月から 2002 年 12 月までの 22 年間を解析対象期間とする。

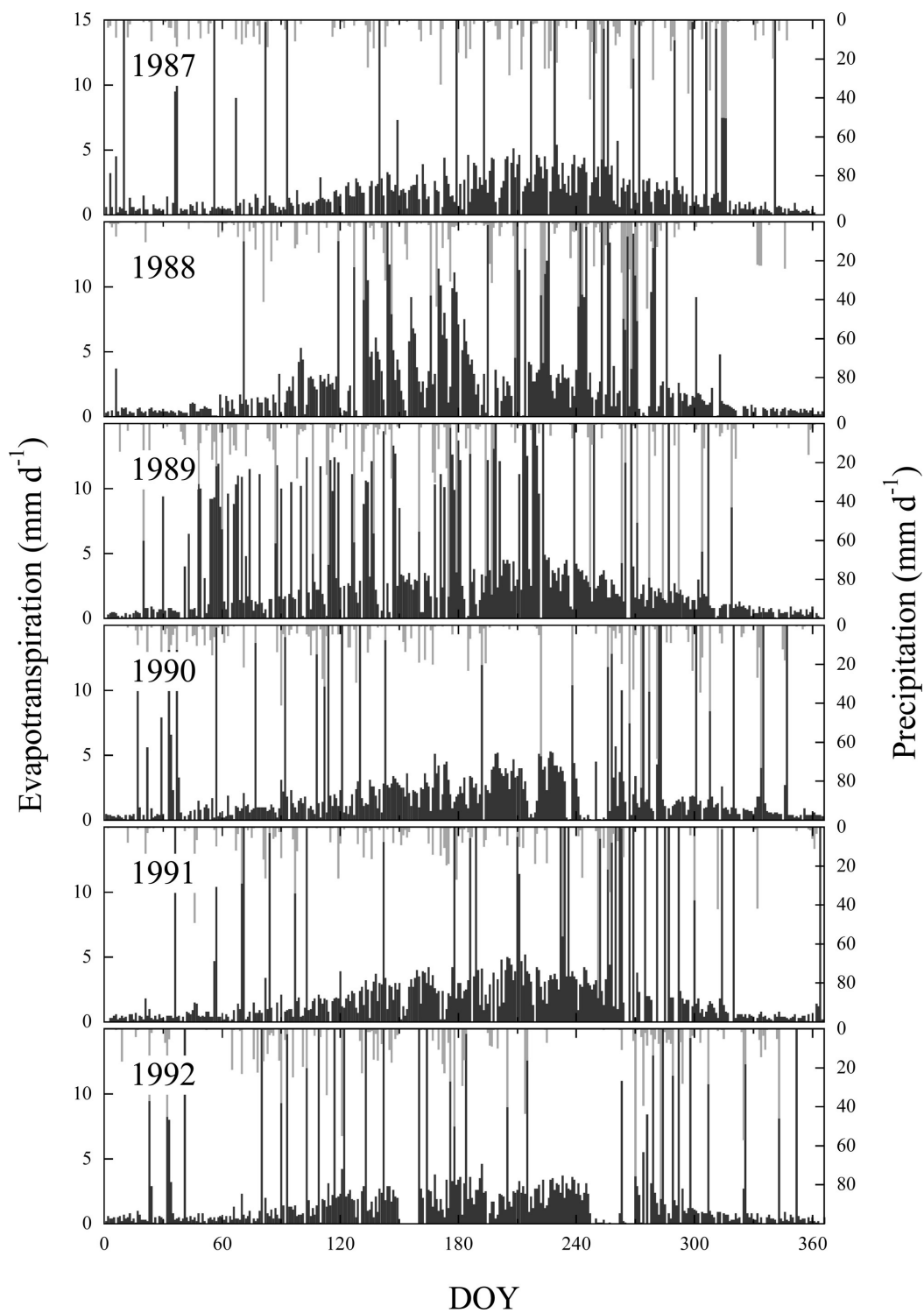
## III ライシメータの測定精度

### 1. ライシメータによる $ET$ の長期変動

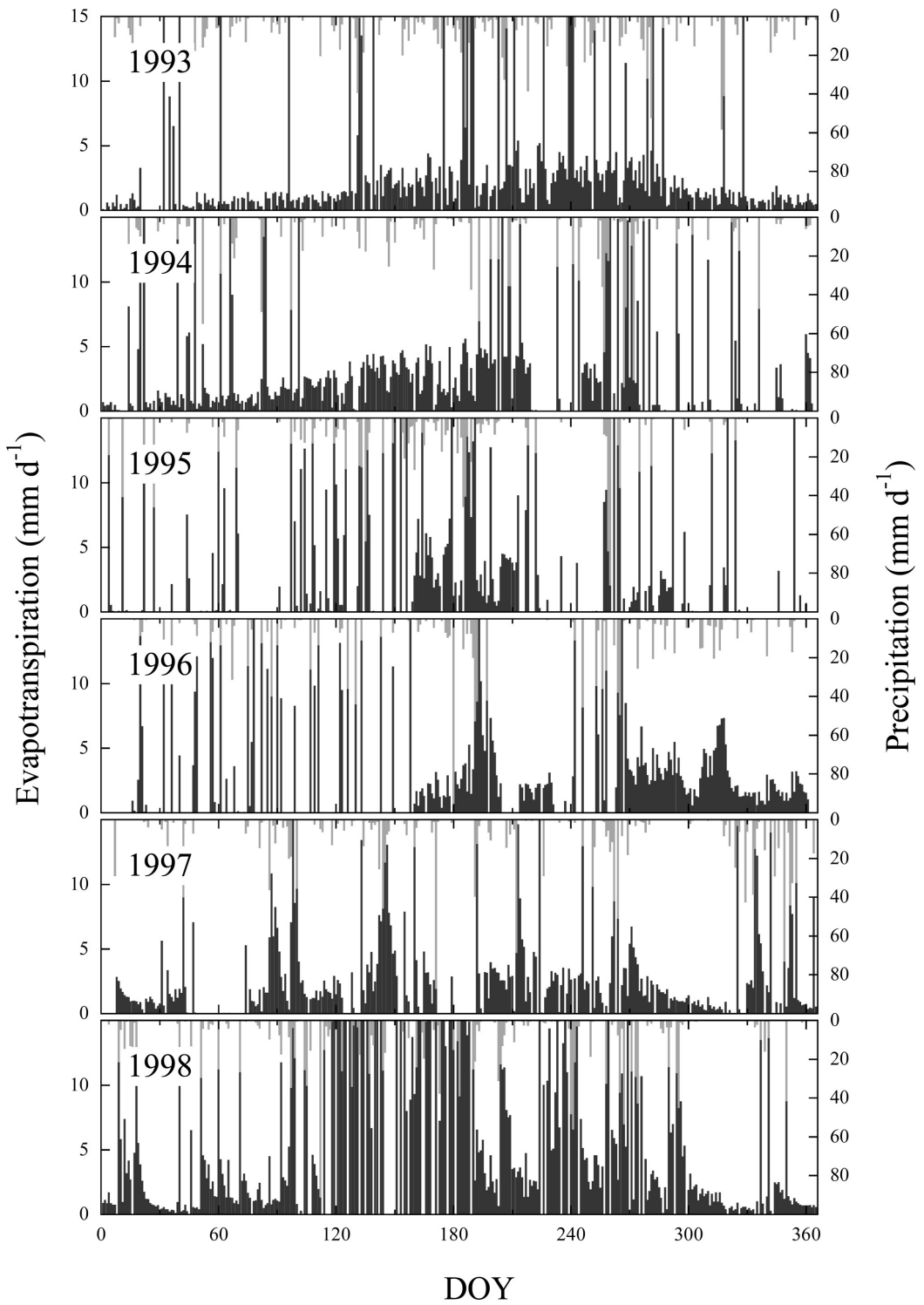
第 1 図に、1981 年 8 月から 2002 年 12 月までの期間における日蒸発散量 ( $mm d^{-1}$ ) と日降水量 ( $mm d^{-1}$ ) の変動を示す。また、田ほか (1995) や熱収支・水収支観測資料をもとに、ライシメータの長期欠測もしくは不調により、異常値を出力している期間が報告されているものについて第 1 表にまとめる。ライシメータのデータを使用する際には、第 1 表に示した期間については注意して頂きたい。また、降雨時や降雨直後は日蒸発散



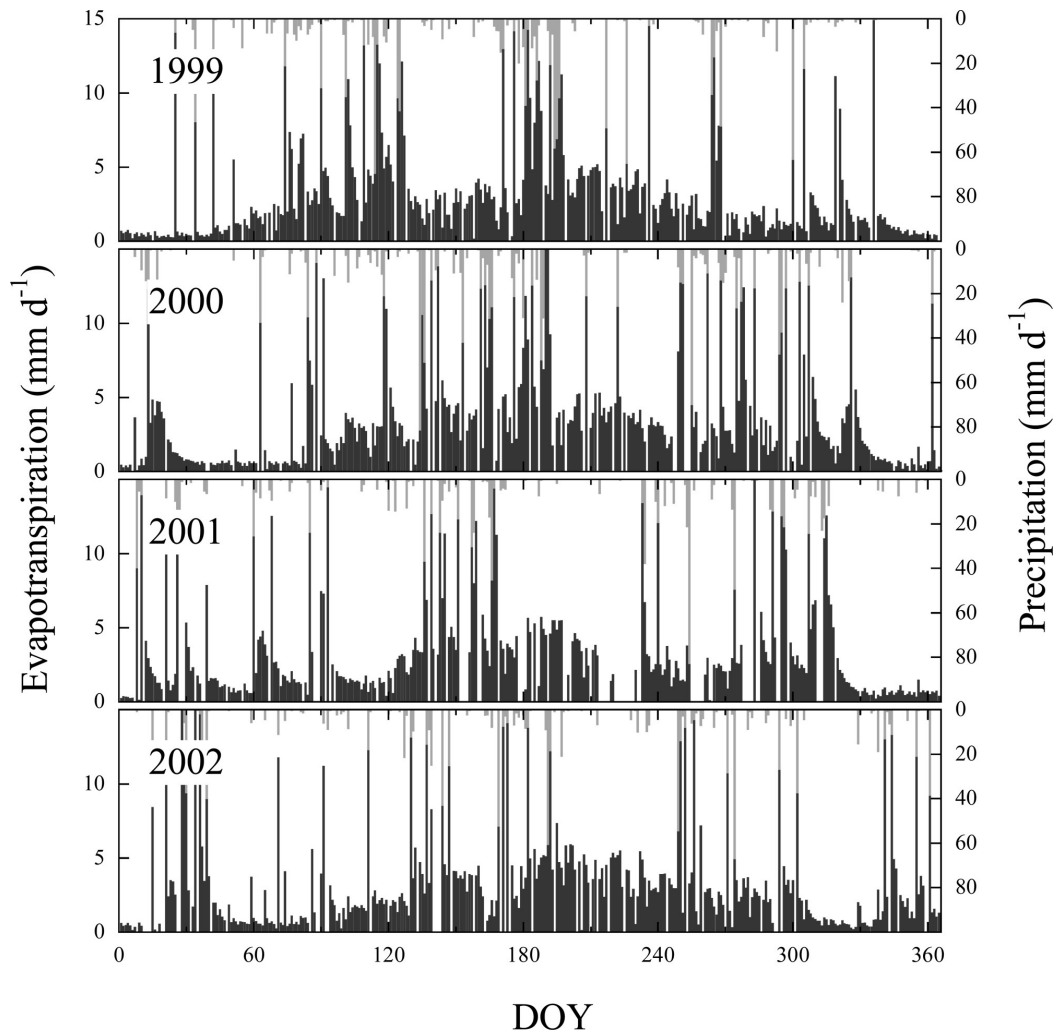
第1図 1981年8月から2002年12月までの日積算蒸発散量と降水量の変動



第1図 続き



第1図 続き



第1図 続き

第1表 ライシメータの長期間欠測もしくは不調の期間

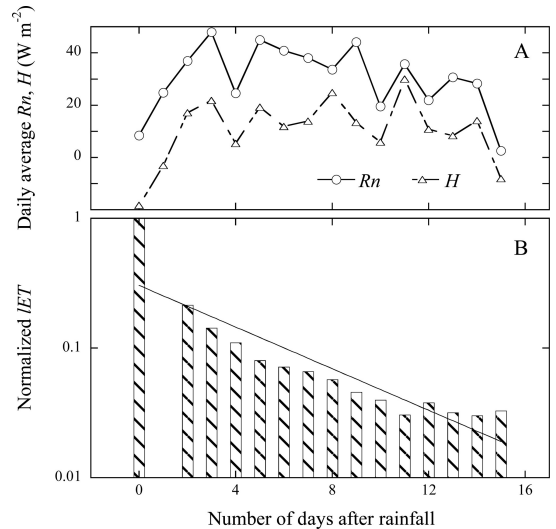
期間	原因
1983/09/27 - 1983/11/16	ライシメータの不調
1984/04/19 - 1984/05/16	光電式秤量計の光源電球劣化
1985/06/27 - 1986/09/03	異常値出力に伴い、この期間に数回に渡り修理が行われている原因は不明
1988/04/29 - 1988/05/14	秤量計出力信号交換機の故障
1988/09/29 - 1988/10/13	水没により排水バルブの修理
1990/08/31 - 1990/09/20	測器のスケールオーバー
1994/09/17 - 1995/06/01	落雷によるライシメータの故障
1995/06/01 - 1997/12/10	感度を高めたことにより風の影響が入り、データの信頼性無し
1997/12/10 - 1998/07/08	トラブル

量の値は極端に上昇もしくは下降する傾向があるために解析に使用するには不適合であると思われる。1994年9月17日の落雷以前に使用されていたライシメータは、降雨直後は異常値を出力しているが、数日以内には日蒸発散量の極端な値は解消される。これに対し、落雷後に設置された新しいライシメータは降雨時に上昇した日蒸発散量その後緩やかに減衰して行き、のこぎりの刃のような日蒸発散量の変動をしている。この傾向は蒸発散量が少ない冬の時期に顕著に表れる。このことから、何らかの問題が発生している可能性が高いと考えられる。この問題についてはⅢの2.で取り上げることとする。

第1図に示すように、ライシメータのデータには多くのノイズが含まれている事がわかる。このために、使用の際には何らかのクオリティーコントロールを行う必要がある。本報告では簡易的なクオリティーコントロールを行い、その結果についてはⅢの4.に記す。しかしながら、一年を通しての蒸発散量の変動傾向は表れており、この傾向をいかに抽出するかが一つの課題であると思われる。

## 2. 降雨の影響

第2図に、2000年11月21日から12月6日における日平均正味放射量と顕熱フラックスの変動(A)と、11月21日の日蒸発散量で正規化した日蒸発散量の変動(B)を示す。第2図(B)において降雨後1日目のデータが欠測になっているが、これは日蒸発散量がマイナスの値を示したためである。この期間を選んだのは、十分な降雨があり、かつ降雨後しばらくの間無降雨が続く夏場に比べて、蒸発散量の値が小さいためにライシメータのトラブルを抽出しやすい、という理由からである。11月17日に23.9 mm、11月20日に14.5 mmの降水量を記録しており、11月21日までに51 mmの降水量があった。このために、21日はライシメータの排水が行われ、その影響により



第2図 2000年11月21日から12月6日における、(A) 日平均正味放射量 ( $R_n$ ) と顕熱フラックス ( $H$ ) と、(B) ライシメータによる日蒸発散量 ( $IET$ ) の変動。日蒸発散量は11月21日の値で規格化してある

日蒸発散量は38.41 mmという値を記録した。排水が正確に行われている場合は、翌22日からは気象条件に支配された蒸発散量の変動を示すはずである。しかしながら、第2図に示すように日蒸発散量は  $R_n$  や  $H$  の変動とは関係なく、日数に対して指数関数的に減衰していく過程が見られる。そしてこの傾向は降雨後11日まで続いている。

古藤田ほか(1978)によると、当該ライシメータの排水は重力排水方式が採用されており、一定の水位に地下水が上昇するとレベルスイッチが検知し、ピンチバルブによって一定レベルに下がるまで自動的に排水が行われるようになっている。このことから、秤が新しくなった後に、ライシメータは排水機構に何らかのトラブルを抱え、そのためにタンクモデルの流出量のような蒸発散量の変動を記録しているものと推測される。残念ながら現時点では原因の究明が出来ておらず、早急にこの問題を調査する必要がある。

以上のことから、1994年6月以降のライシメータのデータを使用する際には、降雨日直後のデー

タは参照する程度にとどめることが妥当であると考えられる。降雨後4日目には日蒸発散量が降雨日の値に対して0.1程度に減少していることから、使用すべきでない期間は降雨後3日間程度と思われる。

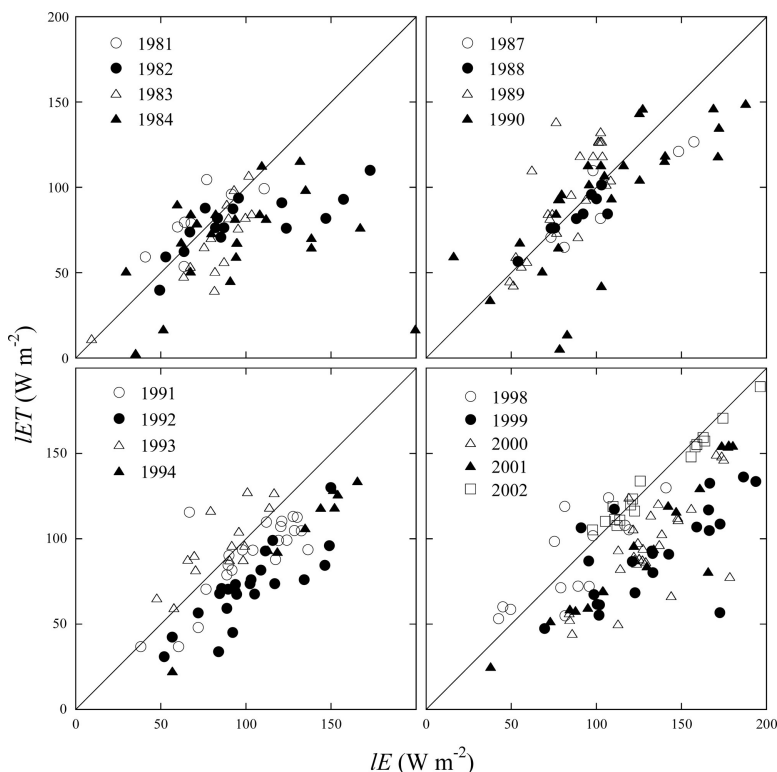
### 3. 感度の経年変化

檜山ほか(1993)によれば、1990年以降ライシメータの時間蒸発散量にばらつきが見られるが、このばらつきはランダムな誤差であるために日積算量として蒸発散量を評価する上では問題がない。そこで、7月から9月の夏期のデータを用いて、解析対象期間における日平均  $IET$  と  $IE$  の関係を調べた(第3図)。データ選別においては、Ⅲの2.の結果に基づき4日間以上降雨が記録されていない日を選んだ。また、夏期にライシメー

タが不調であった年は対象から外してある。

1982年と1984年の潜熱フラックスが大きい時期を除いて、観測開始から1990年まではばらつきはあるものの  $IET$  と  $IE$  は1対1の関係式のまわりに分布している。このことから、1990年まではライシメータの経年変化による  $IET$  と  $IE$  の誤差は無いものと考えられる。1982年と1984年に見られるばらつきであるが、田ほか(1995)によると両年とも8月に超音波風速計の異常が報告されているため、ライシメータの感度には異常がないものと思われる。

田ほか(1994)によると、1990年以降見られるようになったライシメータのノイズは、アイソレータの導入とデータの平滑化により軽減され、 $IET$  と  $IE$  の関係が改善された事が報告されている。また、 $IET$  に比べて  $IE$  が大きくなる原



第3図 ライシメータによる日平均潜熱フラックス ( $IET$ ) と熱収支法から求めた日平均潜熱フラックス ( $IE$ ) の比較



因として水平移流が寄与しているのではないかと考察している。しかしながら、第3図に示すように1991年以降は統計的に熱収支法による潜熱フラックスの値が大きくなっている。また、新しい秤を使用している1998年以降でも同様の傾向が表れている事を考慮すると、上記の事項だけでは説明出来ない。1991年から2002年において $IE$ の値が統計的に大きくなる原因としては、1) 超音波風速温度計の感度劣化に伴い顕熱フラックスが過小評価され、結果として潜熱フラックスが過大評価されている、2) ライシメータの内部計算処理、もしくは測定機器に問題が生じている、の2つが考えられる。1) に関して齊藤・浅沼(2004)は、フラックスメータの倍率設定値の影響により、1994年7月6日以前の顕熱フラックスは数パーセント過小評価されている可能性を示している。しかし、第3図では1991年以降 $IE$ が大きくなっていることから、倍率設定値の影響とは考えられない。また超音波風速温度計の比較観測などを行っていないために、現時点で超音波風速温度計の感度変化については不明である。しかしながら、 $IET$ に対して $IE$ は $\sim 40 \text{ Wm}^{-2}$ のオフセットが乗っているものの感度自体は1対1の関係式と平行にあるために、ライシメータの感度は一定に保たれていると推測される。

#### 4. ノイズの発生頻度

第2表に各年のライシメータのノイズの発生頻度を示す。ただし、欠測もしくはライシメータの不調が長期間記録されている年は対象から外した。データは降雨時を除く1時間値を使用した。ノイズを検出するにあたり、1時間の蒸発散量が1mmを越える、もしくは $-0.5 \text{ mm}$ を下回るデータをノイズとした。本報告は解析対象期間が長期に及ぶために明瞭に異常値と言えるものをノイズと定義した。

ノイズの発生頻度は各年によってばらつきはあるが、その大部分が1～2%台に収まってお

第2表 ライシメータのノイズ発生頻度 (%)

年	サンプル数	ノイズ数	発生頻度 (%)
1981	3386	72	2.1
1982	7948	270	3.4
1983	6881	227	3.3
1984	7098	148	2.1
1987	7953	138	1.7
1988	7237	152	2.1
1989	7721	130	1.7
1990	7579	103	1.4
1991	8118	214	2.6
1992	7884	75	1.0
1993	7742	292	3.8
1994	4586	49	1.1
1999	8171	127	1.6
2000	8070	98	1.2
2001	7496	97	1.3
2002	7930	142	1.8

り、最大でも1993年の3.8%である。1990年以前と以降の発生頻度を比較した場合に、明瞭な違いは見られなかった。このことから、解析対象期間を通してノイズの発生頻度は一定であり、ライシメータの経年劣化の影響は見られないことがわかった。

#### IV おわりに

本報告では、TERC ホームページ上で公開されているデータを用いて、ライシメータと熱収支法から蒸発散量を算出し、長期観測データの比較を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

1. ライシメータの秤を更新した1994年以降、排水機構に何らかの問題が生じた可能性が高い。降雨後数日間はその影響により蒸発散量が過大評価されている。
2. 1990年以降、熱収支法による潜熱フラックスに比べてライシメータによる潜熱フラックスが全体的に小さくなっていることが多いが、年によってその傾向は異なる。また、感度は両手法とも同程度であり、経年的に

ほぼ一定である。

3. ノイズの発生頻度は全期間を通して大きな違いがない。

およそ四半世紀に及ぶ貴重な観測データをもとに、実蒸発散量の長期トレンドを評価するためには、以上の問題を踏まえ適切な補正・欠測処理を行う必要がある。

## 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，**2**，65-89.

齊藤 誠・浅沼 順 (2004)：陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場におけるフラックスデータのシステム間比較と信頼性。筑波大学陸域環境研究センター報告，**5**，87-97.

田 少奮・檜山哲哉・杉田倫明 (1994)：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。筑波大学水理実験センター報告，**19**，57-62.

田 少奮・生川智彦・金子英子・杉田倫明 (1995)：筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測日記。筑波大学水理実験センター報告，**20** 別冊，1-99.

新村典子・杉田倫明 (1999)：ウエイングライシメーターの重量測定システムの更新とその蒸発散量測定値のばらつきの改善について。筑波大学水理実験センター報告，**24**，107-115.

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，**18**，41-53.

Fritschen, L. J. and Gay, L. W. (1979): *Environmental Instrumentation*. Springer-Verlag, 216p.

(2005年5月31日受付，2005年8月25日受理)