

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

Erratic Observation of Evapotranspiration by the Weighing Lysimeter with a Replaced Measurement System and Its Improvement

新村 典子*・杉田 倫明**

Noriko NIIMURA* and Michiaki SUGITA**

I はじめに

植生のある地帯における地表面熱収支・水収支を評価するためには、植物による蒸散を含む地表面からの蒸発散量をより正確に評価することがきわめて重要である。

水理実験センターでは、2つの独立した方法によって蒸発散量を求めることができる。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と熱収支式に基づき間接的に推定する方法である。

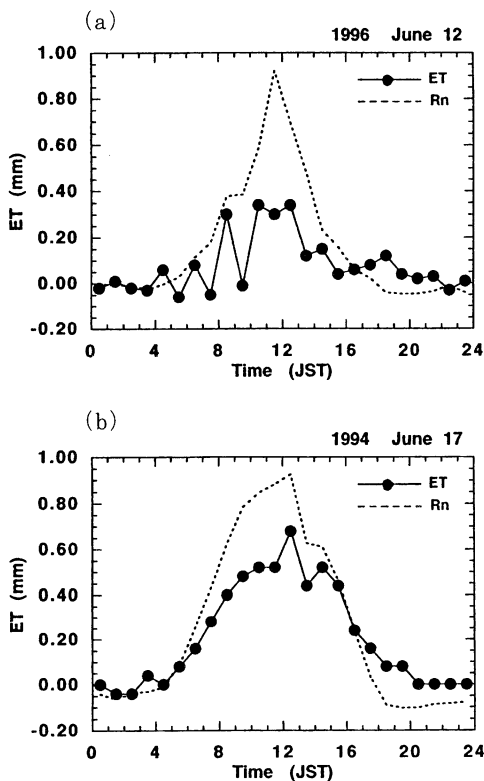
1981年から1992年の期間のライシメーターによる蒸発散量について解析した檜山ほか（1993）によると、1990年以降、ライシメーターによる蒸発散量の1時間平均値は大きくばらついており、日平均値にはそれほど大きな影響はないものの、日変化を評価するには大きな問題となっていることがわかった。田ほか（1994）により、ばらつきのおもな原因は、1) ライシメーターが設置されている圃場の地下室から研究棟までの信号ケーブルの入力信号に含まれるノイズ、2) 日報装置を更新した際に、ライシメーターの蒸発散量が毎正時の瞬間値の差によって示されるようになったことによることがわかった。以前

のプログラムではライシメーターの蒸発散量を求める際に、平滑化处理（平均化处理）が行われていた。日報装置を現在のものに更新したのは1988年11月9日（鳥谷ほか、1989）であるが、蒸発散量や雨量のように1時間の積算値を取るようなデータに関しては、試行錯誤を繰り返し、日報装置用のプログラム（以下、日報プログラムとする）が安定するまでに半年から1年かかった。このため、田ほか（1994）には、「1989年の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。」と記述されていると考えられる。（注意：日報プログラムのマイナーな更新は、たびたび行われている。）

これらのばらつきを解決するために、1) については、アイソレータを入れること、2) については、5分間移動平均をとることで解決できると報告されている（田ほか、1994）。そこで、まず入力信号に含まれるノイズ取り除くために、1994年4月5日より日報装置の手前（第2図、図中A）にエム・システム社製のFVS型アイソレータを入れた。この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もので、蒸発散量のような非常に緩やかな変動には影響はない。

*筑波大学水理実験センター **筑波大学地球科学系

これにより入力信号に含まれるノイズは取り除かれた。しかし、田・杉田(1996)にあるように、1994年9月17日の台風による落雷、それにもなう停電による地下室の水没によりライシメーターの秤が故障し、その後、秤を更新し、1995年6月1日より観測を再開した。このとき、日報プログラム中の平滑化処理を省いてしまったことによるデータのばらつきを解決するために、毎正時の瞬間値の差から求めていた蒸発散量を毎正時5分前から毎正時までの5分間の平均値の差に変更した。しかし、更新した秤の秤量感度が500g(水深換算0.16mm)から100g(水深換算0.032mm)になったことにより、感度が良すぎ風の影響を受けるようになり、再び値がばらつくようになったと田・杉田(1996)により指摘されている。



第1図 ライシメーターから得られた蒸発散量(ET; mm)の時間変化。(a)は、1996年6月12日、(b)は、1994年6月17日のものを示している。正味放射量(Rn)は、水深換算してある。

第1図(a)は、1996年6月12日の蒸発散量の時間変化を示したものである。第1図(b)は、比較のためにアイソレータを入れた後の1994年6月17日のものを示した。どちらも晴天日である。アイソレータを入れた直後の1994年6月17日の蒸発散量の時間変化を見ると、若干のばらつきは見られるものの、なめらかな日変化を示していることがわかる。この若干のばらつきは、田ほか(1994)によって指摘されている移動平均が施されていないことによるものと考えられる。一方、1996年6月12日のものでは、1時間毎の変化が大きくなり、なめらかな日変化は見られない。この日の日中の高度1.6mの風速は1.3m/s前後であり、平均風速は約1m/sであった。比較的静穏な日であったが、蒸発散量データの時間ごとの変化が大きくなっており、これは秤の秤量感度がよくなったことによる影響と思われる。田ほか(1994)では、生データに5分と9分の移動平均を施し、移動平均がより長いほうが良いと報告している。

そこで、以下で述べる装置を導入することにより値のばらつきを改善する処置を試みたので、その結果について報告する。

II 導入した装置について

当センターのライシメーター(島津製作所)は、外径2.0m、高さ2.0mの円筒形の容器であり、容器の中には周囲と同じ状態の土壌が不攪乱で充分に入っており、土壌表面には周囲と同じ植生が生えるようにしている。植生については、現状では、まわりに比べると発育がやや細くなっているように見える。この容器自身は、観測圃場のほぼ中央に埋設され、計測用の電子天秤の上ののっている。当センターのライシメーターに関しては、古藤田ほか(1978)に詳細が述べられているが、1995年6月1日以降、地下室からのデータの送信方法と秤の感度が変わったので、それについてのみここに記す。古藤田ほか(1978)では、p.70の「(2)の出力調整と送信」の部分にあたる。重量変化に対応した電流信号は、アナログ制御機能を兼ねそろえた電子天秤によりデジタル信号に変換され、データ集録室まで送信される。

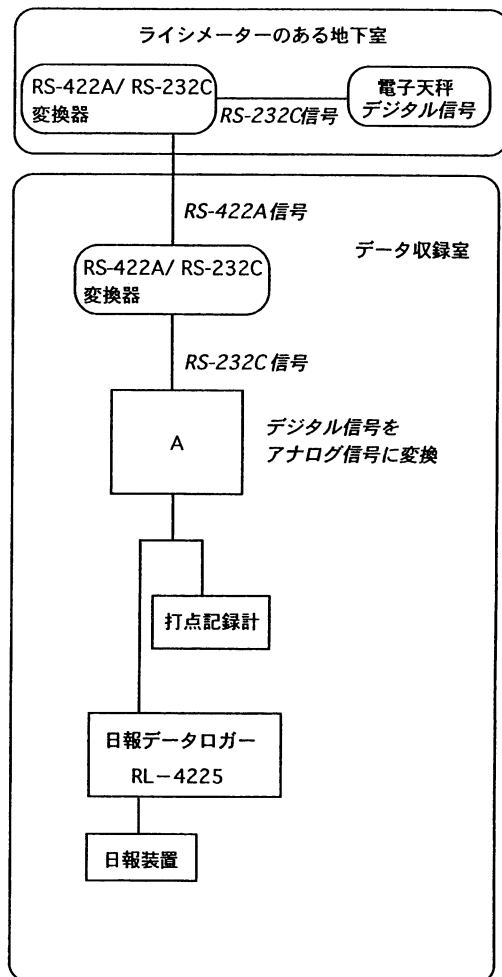
いままで、地下室でアナログ電圧を直流電流にして、データ集録室まで送信し、再びアナログ電圧に変換していたが、現在は、デジタルデータとして集録室まで送信されている。また、秤量感度は500g（水深換算0.16mm）であったが、100g（水深換算0.032mm）になった。この秤量感度は、電子天秤中のROMを交換することにより変更可能である。ライシメーター自身の測定能力としては、重量測定範囲が0-500kgの場合、50000分の1、つまり10gまで測定可能であり、現在使用している電子天秤も同じく、10gまで測定できる。秤量感度が10gであるとしてより風の影響を受けやすいため、現在の秤量感度は100gとなっている。秤の測定範囲と秤量感度については、第1表に示した。

第1表 はかりの仕様 (Specification)

重量測定範囲	0~250kg (±0~250kg)	← 現在の設定
	0~500kg	← フルスケール
秤量感度	100g (水深換算で0.032mm)	

当センターの観測圃場で観測されている観測データは、オンラインで研究棟に送られ、打点記録計に記録され、熱収支・水収支観測データ処理システム（以下、日報装置とする）によってリアルタイムに処理されている（鳥谷ほか、1989）。ライシメーターから送られる信号の流れを第2図に示した。ライシメーターの蒸発散量は、先に示したようにまず、電子天秤によりデジタルの重量値として計測される。その出力信号はRS-232CからRS-422に変換され、圃場からデータ集録室までデータは送られる。再び、RS-422からRS-232Cに変換され、コントローラー（図中A）によりデジタルデータからアナログデータに変換され、打点記録計と日報装置によって処理されている。日報装置内のアナログ・デジタル変換器（A/D変換器）は、アナログ信号を0.68秒ごとにサンプリングし、デジタルデータに変換している。

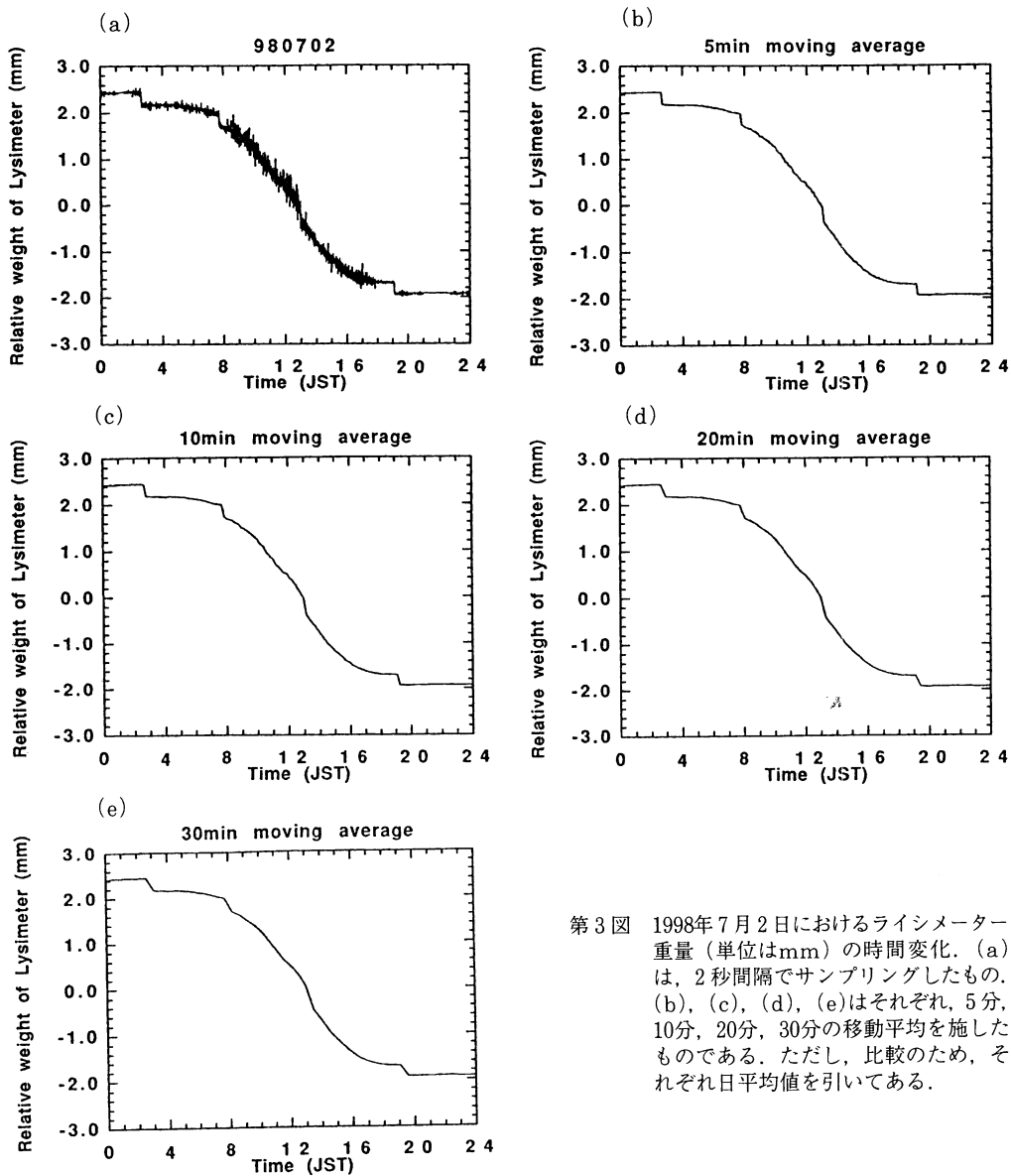
ライシメーターで測定される蒸発散量のばらつき



第2図 観測圃場に設置されているライシメーターから送られる信号の流れ。

のおもな原因は、先に述べたように秤の秤量感度が500g（水深換算0.16mm）から100g（水深換算0.032mm）になったことにより、感度が良すぎ風の影響を受けるためである。そこで、風の影響を取り除くために、図中Aに平均化処理を行うコントローラー（MUC-175SZ: ミュー精器株式会社）を導入した。いままでは、単にデジタルデータからアナログデータに変換するコントローラーであった。

このコントローラーでは、データのサンプリングは2秒間隔で行われており、0~1998秒（約33分）の範囲内で任意に変えることができる平均化の時間で移動平均を行った後、結果をアナログ信号で出力



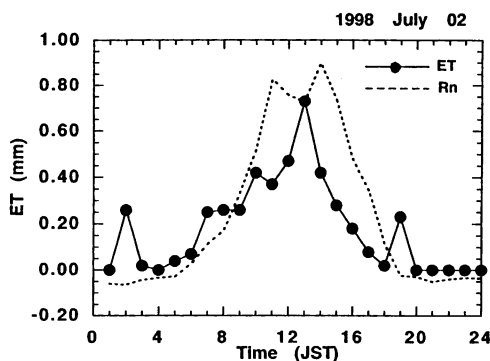
第3図 1998年7月2日におけるライシメーター重量（単位はmm）の時間変化。(a)は、2秒間隔でサンプリングしたもの。(b), (c), (d), (e)はそれぞれ、5分、10分、20分、30分の移動平均を施したものである。ただし、比較のため、それぞれ日平均値を引いてある。

する。現在は、平均化時間は20分で計測を行っている。蒸発散量は、日報装置では毎正時5分前から5分間の平均値の差によって求められているので、コントローラーの平均化時間が20分の場合、例えば、11:00に出力される蒸発散量のデータというのは、10:35から11:00のライシメーター重量平均値と9:35から10:00のライシメーター重量平均値の差ということになる。

ここで、平均化時間を決めるため、1998年7月2日にパソコンにサンプリングしたライシメーターの生データを用いて検討した。第3図(a)は、2秒間隔でサンプリングしたライシメーター重量（単位は、mm）の時間変化を示したものである。これを見ると、5～6時間毎に0.3mmぐらいずつ急激に軽くなることをのぞくと、夜間は0.1mmぐらい、昼間は0.5mmぐらいのばらつきが見られた。第3図(b)は、

5分間の移動平均を施したものである。生データに見られた大きなばらつきは少なくなったが、昼間のデータには、ばらつきが少し残っている。10分間の移動平均を施した第3図(c)は、5分のものに比べるとその変化はなめらかになっており、20分のものと比べるとさらになめらかになっている(第3図(d))。さらに、30分間の移動平均を施した第3図(e)が、20分のものとはほとんど変化が見られないため、先に述べたように平均化の時間は20分間とした。

また、20分移動平均を施したデータを用いて、日報装置で行っている計算処理と同様の方法(毎正時5分前から5分間の平均値の差)によって、蒸発散量を求めたものが、第4図である。第1図(a)に示



第4図 1998年7月2日のライシメーター重量データに20分移動平均を施したデータを用いて、日報装置と同様の方法で求めた蒸発散量の日変化。正味放射量(Rn)は、水深換算してある。

したようなばらつきはなくなり、かなりなめらかな日変化を示していることがわかる。2時、7時、13時、19時にピークが見られるが、これは、生データで調べたときにも見られた、5～6時間毎に0.3mmぐらいずつ急激に軽くなっていたことによるものと考えられる。この変化について調査した結果、コントローラーとは別のところで起こっている現象であることがわかった。製作者によると天秤の竿を支えているV字型のくさびと竿の間がさびてしまったことにより摩擦が大きくなり、重量の変化がなめらかに反映されていない可能性があるとの指摘を受けた(嶋津製作所・矢木, 私信, 1999)。ライシメーターが埋設されている地下室は、1994年に水没して

いることもあり、この可能性が大いにあると考えられる。しかし、これらの変化は、日積算値の測定には影響がないと考えられる。ただし、日変化を調べたい場合には、時間帯によっては0.3mm程度の誤差が含まれることもあるため、生データをとったり、チャート紙を見て確認し、使っていただきたい。

また、出力されるアナログ信号のレンジは、DC 0-1Vが0-500kg(水深換算159.2mm)とDC 0-1Vが0-100kg(水深換算31.84mm)の2種類から選ぶことができる。現在は、より細かな変化がみられるようにDC 0-1Vが0-100kgとなるレンジを使用し測定している(以下、電圧を示す値は、すべてDCである)(第2表)。アナログ出力の分解能は0.1%であり、有効数字は3桁である。このため、0-1.000Vと設定されている場合、出力が0.999Vから1.000Vになったときに下3桁しか取ることができないため、見かけ上0Vになり、出力値がおかしくなっている。現在動いている日報プログラムは、このような出力に対応していないので、この点については、問題点として残っている。今後の課題である。

第2表 コントローラーの仕様 (Specification)

アナログ出力の設定範囲	チャンネル1	0-1V	0-500kg
	チャンネル2	0-1V	0-100kg 現在の設定
サンプリング間隔	2秒		
移動平均時間の設定範囲	2秒~1998秒 (2秒~約33分)		

注1. チャンネル1,2ともに測定重量値を超えると出力を0Vに戻し再び増加していく(折り返し方式)

注2. 重量値表示値がマイナスの場合、出力は0Vのままとなる。

Ⅲ ライシメーター法と熱収支法による蒸発散量の比較

先に述べたように、蒸発散量は、ライシメーターによる直接的方法と熱収支式から求める間接的方法の2種類の独立した方法により求められる。この2つの方法によって求められる潜熱フラックスの比較を行った。ライシメーター法と熱収支法による潜熱フラックスの求め方は、檜山ほか(1993)を参考にした。以下、簡単にこれらの求め方を示した。

ライシメーターから得られる蒸発散量 (ET ; mm) より, 潜熱フラックス (LET ; W/m^2) は次式で求められる。

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

ここで, Le は気温 T_a ($^{\circ}C$) における蒸発の潜熱 (J/kg), Δt は ET を測定した時間 (s), ρ は水の密度 ($=1000kg/m^3$) である。観測データは1時間積算値として得られているので, 本解析では, $\Delta t = 3600$ とした。ここで Le は次式により求められる (Fritschen and Gay, 1979)。

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

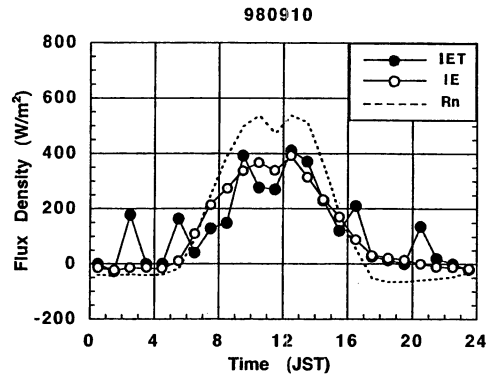
一方, 熱収支法においては, 地表面の熱収支は次式で与えられる。

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

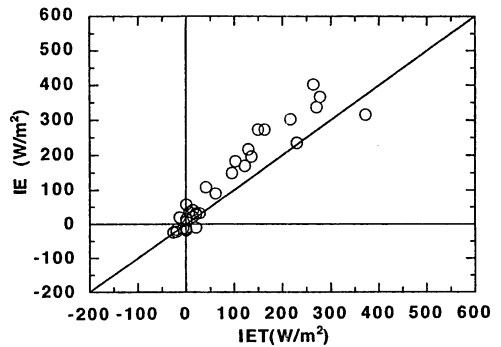
ここで Rn は正味放射量 (W/m^2), G は地中熱流量 (W/m^2), H は顕熱フラックス (W/m^2) である。檜山ほか (1993) によれば, 地表面から深さ 2 cm までの当センター土層における貯熱量変化は無視できるため, G の値は地表面下 2 cm に設置された地中熱流板の出力をそのまま用いる。顕熱フラックス (H ; W/m^2) は, 次式で与えられる。

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

ここで ρ_a は空気密度 (kg/m^3), c_p は空気の定圧比熱 ($J/kg/K$), ω は風速の鉛直成分 (m/s), T は気温 (K) である。バーは平均を表し, プライムは平均値からのずれ (偏差) を示している。この値は, 超音波風速温度計による測定結果をアナログデータ処理を介することにより求められる。なお, 水理実験センターのルーチン観測では平均化の時間は10分となっている。(4)式により顕熱フラックスが求めれば, 熱収支式(3)を用いることにより潜熱フラックスが求められる。

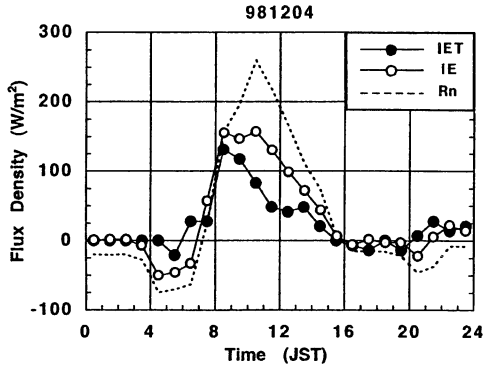


第5図 1998年9月10日における潜熱フラックス。 LET と IE はそれぞれライシメーターと熱収支法から求めた潜熱フラックス。 Rn は, 正味放射量である。

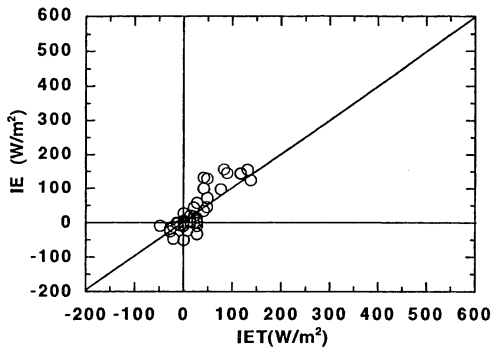


第6図 1998年9月10日から9月11日の期間に得られた潜熱フラックス (LET) と (IE) の比較。 LET と IE はそれぞれライシメーターと熱収支法から求めた潜熱フラックス。実線は, それぞれの $0W/m^2$ および, 1対1を表す。

第5図は1998年9月10日におけるライシメーター法により求めた潜熱フラックス (LET) と熱収支法により求めた潜熱フラックス (IE) を示している。正味放射量 (Rn) も示した。ライシメーター法から得られた潜熱フラックス (LET) と熱収支法から求められた値 (IE) を比較すると, 双方とも日変化の傾向は似ていることがわかる。全体の傾向として, 日中は熱収支法からのフラックスの値がライシメーターからの値に比べてやや大きい。ただ, 第3図でみられた機械的な重量変化のため時間によっては, ライシメーターからの値が熱収支法からの値に比べ高くなっている。ここでは, 2-3時, 5-6時, 9-10時, 12-13時, 16-17時, 20-21時に見られる。そこで,



第7図 1998年12月4日における潜熱フラックス、 IET と IE はそれぞれライシメーターと熱収支法から求めた潜熱フラックス、 Rn は、正味放射量である。



第8図 1998年12月4日と12月6日の期間に得られた潜熱フラックス (IET) と (IE) の比較。 IET と IE はそれぞれライシメーターと熱収支法から求めた潜熱フラックス、実線は、それぞれの $0W/m^2$ および、1対1を表す。

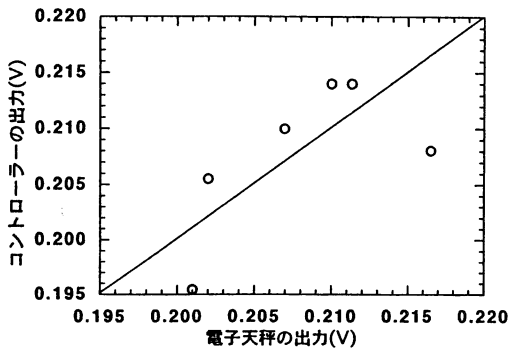
1998年9月10日から9月11日の期間に得られた潜熱フラックス (IET) と (IE) を比較すると、熱収支法からの値 (IE) がライシメーターからの値に比べ平均的に約50%大きく見積もられる傾向が見られた(第6図)。この解析では、チャート紙を調べ、機械的な重量変化が認められた時間のデータはのぞいてある。

また、圃場の草刈りを行った後の1998年12月4日についても9月11日と同様の比較を行った(第7図)。ライシメーター法から得られた潜熱フラックス (IET) と熱収支法から求められた値 (IE) を比較すると、夏季よりも、双方の日変化傾向は似ている。また、夏季と同様に、熱収支法から求めた潜熱フラックスがライシメーターから得られた潜熱フラックス

に比べ高い値を示した。同じように、1998年12月4日と12月6日の期間に得られた潜熱フラックス (IET) と (IE) を比較してみると、熱収支法から求めた潜熱フラックスがやや高い値を示す傾向にあった(第8図)。しかし、その差というのは、先に示した夏季に比べると、減少しており平均的に約30%であった。

これらのライシメーターから得られた潜熱フラックスと熱収支法から得られた潜熱フラックスとの違いについて、まず、熱収支法において顕熱フラックス (H ; W/m^2) を算出するデータとして使用している超音波風速温度計の観測位置に問題があるのではないかと考えた。観測期間中、高度1.6m(夏季は、2.2mにかさ上げしている)にある超音波風速温度計は、夏季は観測鉄塔の南東側に設置されており、冬季は、北西側に設置されていた。観測期間中の主風向を調べると、夏季は、ほぼ南、冬季は、ほぼ北であり、超音波風速温度計により測定されているデータが鉄塔の影響を受けていたということは考えがたい。

そこで、コントローラーから出力されるアナログ信号に含まれる誤差について検討した。ライシメーターの重量を測定している秤に重さのあらかじめわかっている約20kgの重りをのせることによって、コントローラーからの出力の変化を調べた。おもりの重さとコントローラーから出力された結果を第9図に示す。おもりの重さは、ライシメーターのおいてある地下室の秤の上におもりをのせる前後の差より求めた。コントローラーの出力レンジは、0-1Vが0-100kgになるように設定されているため、specification との関係により、20kgの加重の出力は0.2Vとなる。ここでは、おもりの値(kg)は電圧に換算した値(V)で表示してある。これをみると、おもりの重さに対するコントローラーからの出力値は、正・負どちらにもばらついていることがわかった。また、このばらつきを平均すると、0.1V(水換算で3.184mm, $2211W/m^2$)の出力値に対して、 $\pm 0.000205V$ (水換算で0.0065272mm, $4.5W/m^2$)であることがわかった。specification との関係により得られる値に比べ約 $\pm 0.0002V$ (水深換算では



第9図 おもりの重さとコントローラーから出力された値の比較。ここでは、おもりの値 (kg) は電圧に換算した値 (V) で表示してある。

0.0065mm) 差があったわけだが、ライシメーターに加重を与えてから値が安定するまでに20分間掛かっていることを考慮すると、この差は測定誤差の範囲内であると考えられる。

さらに、コントローラーから出力されるアナログデータをデジタルデータに変換する際に生じる誤差について検討した。観測圃場で測定されたアナログデータは、オンラインで研究棟に送られ、日報装置内のアナログ・デジタル変換器 (A/D変換器) により、デジタルデータに変換されている。その変換時の誤差について調べた。ここでは、定電圧発生装置を用いることにより任意の電圧を日報装置に送り、そのデジタル出力値の確認を行った。日報装置のA/D変換パラメーターは、0-1Vが0-100kgとなるように設定されているので、精度的には0.1Vの電圧の変化は、3.184mmの変化に相当する。定電圧発生装置の実験は、3回行った。0.1Vの電圧を加えると、日報デジタルデータは、3.19、3.20、3.20mm変化し、どの値をとっても精度的に見積もられる値よりもやや大きく、平均すると約0.016mm (0.0005V) 大きく出力されていた。今回使用した定電圧発生装置はかなり古いものであったため、電圧を日報装置に入力するときにテスターでその入力値の確認を行っていた。このテスターでは、0.00001Vまで計測することができるので、この違いは、測定誤差ではないと考えられ、コントローラーから出

力されるアナログデータをデジタルデータに変換する際に、若干の誤差が生じることがわかった。

しかし、これらの誤差というのは、例えば、0.01V (水換算で0.3184mm, 221W/m²) の変化量に対して、0.00005V (水換算で0.0016mm, 約1W/m²) であり、コントローラーから出力されるアナログデータをデジタルデータに変換する際の誤差以上に、ライシメーターから得られた潜熱フラックスと熱収支法から得られた潜熱フラックスは異なっていた。

そこで、圃場の状態について考えてみると、現在の圃場は、夏場は、一面草に覆われているが、そこに生える草の種類やその育ち方は、場所によって異なっている。しかし、冬季は、一様に草刈りがなされている。ライシメーターから得られた潜熱フラックスと熱収支法から得られた潜熱フラックスを比較すると、夏季に比べ冬季は、差が小さく平均的に約30%低い値となっていた。

以上の実験の結果より、ライシメーターによって測定された潜熱フラックスと熱収支法から求められた値の差というのは、場所による地表面状態や土壌中の貯熱量の違いではないかと考えられる。

IV まとめ

1996年6月1日の秤の更新に伴い、ライシメーターによって測定される蒸発散量の値がばらつくようになったため、その改善を行った。改善後のデータを用い、ライシメーターによって測定される潜熱フラックスと熱収支法から算出される潜熱フラックスの比較を行った。

ライシメーター法から測定された潜熱フラックスと熱収支法によって求められた潜熱フラックスを比較すると、日変化の傾向はほぼ一致していた。

ただ、ライシメーター法から測定された潜熱フラックスの値が、熱収支法によって求められた潜熱フラックスよりも夏季、冬季ともに低い傾向を示し、その割合は、30-50%であった。この違いは場所による地表面状態や土壌中の貯熱量の違いと考えられるため、このコントローラーを導入することによって、ウェイングライシメーターによる蒸発散量のばらつ

きは現時点においては、ほぼ改善されたと考えられる。しかし、現在のコントローラーを導入したことで、現在の日報装置が対応していない部分がでてきた。これについては、早急に対応しなければならない今後の課題である。

引用文献

- 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, 65-98.
- 田少奮・檜山哲哉・杉田倫明 (1994) : ウェ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, No. 19, 57-62.
- 田少奮・杉田倫明 (1996) : 熱収支・水収支観測資料 -1994年・1995年-。筑波大学水理実験センター報告, No. 21, 61-115.
- 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) : ウェイングライシメーターと熱収支法により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.